

PROJEKTNR. 13556

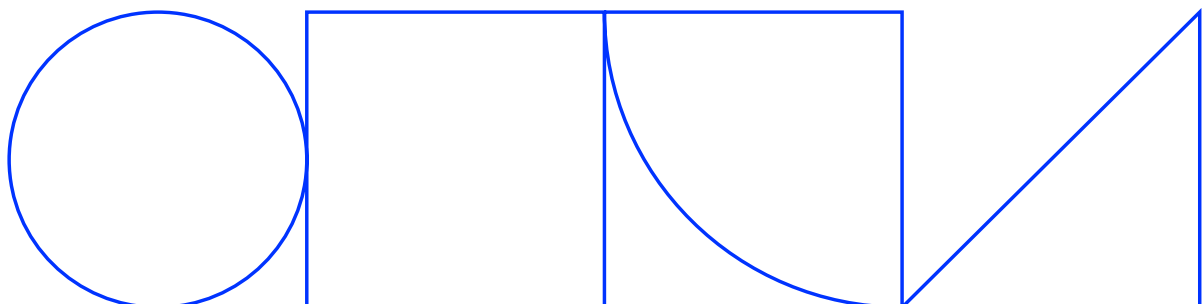
Armeringsstation - robottillverkning av armering

BYGGAUTOMATION

Slutrapport

Lars Pettersson och Ulf Håkansson
Skanska Sverige AB

2023-12-31

SKANSKA



FÖRORD

Projektet har drivits som ett högskoledoktorandprojekt vid Mälardalens högskola, MDH, (numera universitet, MDU) inom forskarskolan ARRAY. Det har drivits parallellt med projektet Byggautomation – Armering ("Vinnovaprojektet"), ett innovationsprojekt i samarbete mellan Skanska, ABB och Husqvarna och delfinansierat av Vinnova (genom Infra-Sweden2030) och TRV/BBT där installation av armering med hjälp av industrirobotar studerades. Tre tidigare projekt har också drivits med stöd av SBUF, Banplanering (SBUF 13666), Robotsvetsad armering (SBUF 13745) och Najningsverktyg för industrirobot (SBUF 13823)

Doktoranden, Mahdi Momeni, har handledts av professorerna vid MDU Alessandro Papadopoulos och Thomas Nolte.Handledning från industrins sida (Skanska, ABB och Robotdalen/Enodo Robotics) har genomförts av Ulf Håkansson (Skanska), Lars Pettersson (Skanska), Ingemar Reyier (ABB) och Johan Relefors (Robotdalen/Enodo Robotics).

Mahdi Momeni har ännu inte avlagt licentiat-examen men de planerade artiklarna har färdigställts och publicerats med undantag från en artikel som har status "skickad för peer review". Artiklarna finns redovisade i referenslistan nedan och har också bifogats denna rapport.

Denna slutrapport för SBUF-projekt 13556 tar utgångspunkt i de artiklar som tagits fram inom doktorandprojektet. För att sätta in detta i sitt sammanhang beskrivs här även det utvecklingsarbete som utfördes före doktorandprojektet respektive Vinnovaprojektet, samt det arbete som utfördes inom ramen för Vinnovaprojektet. Syftet med att utforma rapporten på detta sätt är att tillgängliggöra projektets hela resultat för branschen och därmed möjliggöra att vidare forskning och utveckling tar avstamp från detta.

Projektteamet vill tacka SBUF för det finansiella stödet under projekttiden.

December 2023

Lars Pettersson och Ulf Håkansson

SAMMANFATTNING

Denna rapport beskriver det utvecklings- och forskningsarbete som har bedrivits i samarbete mellan Skanska och ABB sedan 2014 med syftet att studera om det är möjligt att montera armering med hjälp av industrirobotar och därmed automatisera en byggaktivitet. Genom erfarenheter från ett av Skanskas byggprojekt inom Norra Länken-projektet, där armering prefabricerades manuellt i stora enheter och lyftes in i formarna, inriktades utvecklingsarbetet på maskinell tillverkning av prefabricerade armeringsenheter direkt på arbetsplatsen med målet att öka effektiviteten i detta arbetsmoment och på det sättet öka produktiviteten. Projektet benämndes Byggautomation – armering och den tänkta maskinen Automatisk armeringsstation.

Arbetet inleddes med en konceptstudie, dvs en undersökning av den tänkta maskinens principiella utformning. Viktiga parametrar för konceptstudien var armeringsjärnens låga böjstyvhets, att räckvidden för en industrirobot är relativt kort, att en industrirobot har möjlighet att byta verktyg och att industrirobotar har möjlighet att utföra uppgifter koordinerat. Konceptstudien resulterade i en gantry-konstruktion där tre robotar hänger upp och ner i var sin bom. Bommarna är i sin tur försedda med motorer/kuggstänger som möjliggör att robotarna kan röra sig dels i horisontalplanet, dels i vertikalled. Konstruktionen kompenserar på detta sätt för robotarnas relativt korta räckvidd. För att kontrollera att konceptet fungerade tillverkades en armeringskorg (hämtad från en vägbro över Mälärbanan) i sin helhet digitalt, dvs i datorsmiljö. Datorsimuleringen åtföljdes därefter av laboratorieförsök för att ytterligare verifiera konceptet. Laboratieversionen av gantryn möjliggjorde i detta skede enbart rörelser i horisontalplanet. Konceptfasen avslutades med teoretiska (matematiska) studier av problemet med banplanering och undvikande av hinder. Den bana som åsyftas är den bana som det enskilda järnet behöver flyttas, från en hämtaposition till den slutliga positionen i armeringskorgen. Vid en sådan förflyttning måste hinder i form av andra armeringsjärn, robotarna själva och gantryn undvikas. Resultatet av denna studie var algoritmer som beräknar de robotrörelser som krävs för en sådan förflyttning av ett enskilt armeringsjärn.

Armeringskorgen som användes i förstudierna byggdes i nästa fas av projektet manuellt för att kontrollera byggbarhet och detaljuppgifterna i den digitala modellen. I samband med detta arbete parametriserades korgen, dvs all geometri (såsom korsningspunkter, skarvar mm) tabellerades tillsammans med uppgifter om järnens installationsordning och positioner för robotarnas verktyg. Dessa uppgifter användes i sin tur som indata till algoritmerna som beräknar robotarnas rörelser. Gantry-konstruktionen byggdes samtidigt om för att möjliggöra att robotarna även kunde röra sig i vertikalled. Den användes sedan för att kontrollera funktionen hos - och vidareutveckla - algoritmerna för beräkning av robotrörelserna för att montera enskilda armeringsjärn.

För att maskinen skulle bli helautomatisk krävdes att alla data som beskrevs i den manuella parametreringen kunde beräknas automatiskt. I denna teoretiska (matematiska) studie utvecklades algoritmer där installationsordningen ("hur man bygger") är den centrala delen. Algoritmerna baserades på metoden med "att montera ihop genom att montera isär (eng. assembly by disassembly)", dvs den kompletta korgen plockades isär järn för järn. Metoden leder till ett sökträd som måste kontrolleras med olika typer av villkor, bland annat möjliga positioner för robotverktygen. Sökträdet leder i sin tur till ett mindre antal tänkbara installationsordningar som sedan kontrolleras med algoritmerna för banplaneringen. Så snart en fungerande installationsordning hittats avbryts sökningen. Orsaken till att banplaneringen inte används direkt för att finna en möjlig installationsordning genom "trial and

error”-metoden är att antalet tänkbara installationsordningar i utgångsläget är $N!$ (fakultet) där N är antalet järn i korgen.

I den avslutande fasen av projektet provades algoritmerna på två olika armeringskorgar med hjälp av laboratorieprototypen av armeringsstationen. Tillverkningen av de två korgarna dokumenterades bland annat genom videofilmning. En kort film som visar tillverkningen har lagts upp på Youtube.

Det viktigaste resultatet från studien är att det är möjligt, utgående från en digital modell av den armeringskorg som ska tillverkas, att göra detta automatiskt med hjälp av en maskin. Att en digital modell utgör indata innebär att olika armeringskorgar kan tillverkas av maskinen; och det därmed inte är nödvändigt med standardiserade/förenklade typer eller serietillverkning. Algoritmerna beräknar de robotrörelser som är nödvändiga för tillverkningen. Detta innebär att det ursprungliga syftet med projektet, att undersöka om automatisk arbetsplatstillverkning av armeringskorgar är möjligt, är uppfyllt.

Projekresultatet innebär ett stort steg mot ”flexibel automation”, dvs att tillverkningen sker med små volymer och stor mix (”enstycksproduktion”) där robotarna styrs av algoritmer baserat på 3D modellen av det som skall byggas till skillnad från att vara programmerade, vilket är det normala för styrning och kontroll av robotar inom den tillverkande industrin idag.

Sammanfattningsvis har projektet varit fokuserat på frågan om styrning av industrirobotarna och vilka data som ska användas som indata för styrningen. Arbetshandlingar i form av digitala armeringsmodeller kan principiellt användas som indata men eftersom sådana modeller normalt sett visar den permanenta armeringen enbart behöver de kompletteras med tex monteringsarmering. I dagens arbetshandlingar redovisas monteringsarmeringen enbart principiellt med tillåtna diametrar, täckande betongskikt etc. (arbetet med att utforma monteringsarmeringen lämnas därmed till yrkesarbetarna), men behöver för tillverkning med hjälp av industrirobotar visas redan i arbetshandlingen, dvs i den digitala modellen.

I projektet har styrningen av robotarna varit i fokus. Utveckling av robotverktyg (gripdon, trådmattning till najningsverktyget, fixtur mm) har därför enbart drivits till en nivå som har varit lämplig för laboratorieprototypen. För en fullskalaprototyp behöver robotverktygen utvecklas vidare med hänsyn till robusthet, livslängd etc.

Viktiga frågeställningar för framtida utvecklingsarbete är också hur tillverkningen kan kontrolleras, verifieras och dokumenteras med hjälp av sensorer, dels hur sensorer kan användas för att hantera avvikelser från den teoretiska geometrin för det enskilda järnet (till exempel genom att förkasta ett tillverkat järn vid allt för stora avvikelser).

En annan frågeställning för den fortsatta forskningen inom området Byggautomation är hur resultatet från projektet kan tillämpas för andra byggaktiviteter och därmed möjliggöra att även dessa kan automatiseras.

SUMMARY

This report describes the research and development work that has been carried out in collaboration between Skanska and ABB since 2014 with the objective of studying whether it is possible to install reinforcement with the help of industrial robots and thereby automate this construction activity. Based on experience from one of Skanska's construction projects within the Northern Link project in Stockholm, where reinforcement was prefabricated manually in large units and lifted into the formwork, the development work was focused on mechanical manufacturing of prefabricated reinforcement units directly at the job-site with the goal of increasing efficiency of this task and thus increasing overall productivity. The project was named Automated Construction – Reinforcement.

The work began with a concept study, i.e. an investigation of the intended machine's basic design. Important parameters for the concept study were the low bending stiffness of the rebars, the relatively short reach of an industrial robot, the ability of an industrial robot to change tools and the ability of industrial robots to perform tasks in a coordinated manner. The concept study resulted in a gantry design where three robots hang upside down in three booms. The booms, in turn, are equipped with motors/racks that enable the robots to move both horizontally and vertically. In this way, the design compensates for the relatively short reach of the robots. To check that the concept worked, a reinforcement cage (taken from a road bridge over Mälarbanan, Stockholm) was manufactured in its entirety digitally, i.e. in computer environment.

The computer simulation in the model was then followed by laboratory experiments to further verify the concept. The laboratory version of the gantry, at this stage, only allowed for movements in the horizontal plane. The concept phase was ended with theoretical (mathematical) studies of the problem of path planning and collision avoidance. The path referred to is the path that the individual rebar needs to be moved, from a pickup position to the final position in the reinforcement cage. In such a move, obstacles in the form of other rebars, the robots themselves and the gantry must be avoided. The result of this study was algorithms that calculate the robotic movements required for such a movement of a single rebar.

The reinforcement cage used in the feasibility study was built manually in the next phase of the project to check the constructability and details of the digital model. In connection with this work, the cage was parameterized, i.e. all geometry (such as intersections, joints, etc.) was tabulated together with information about the installation order of the rebars and the positions of the robots' tools. This data, in turn, was used as input to the algorithms that calculate the robots' movements. At the same time, the gantry design was rebuilt to enable the robots to move also vertically. It was then used to check the function of - and further develop - the algorithms for calculating the robotic movements to install individual rebars.

For the machine to be fully automatic, all the data described in the manual parameterization had to be calculated automatically. In this theoretical (mathematical) study, algorithms were developed where the installation order ("how to build") is the central part. The algorithms were based on the method of "assembly by disassembly", i.e. the complete cage was disassembled rebar by rebar. The methodology leads to a search tree that must be checked using different types of conditions, including possible positions of the robot tools. The search tree, in turn, leads to a smaller number of possible installation orders, which are then controlled by the path planning algorithms. As soon as a valid installation order is found, the search is terminated. The reason why the path planning is not used directly to find a possible installation order through a "trial and error" method is that the number of

theoretically possible installation orders is $N!$ (factorial) where N is the number of rebars in the cage.

In the final phase of the project, the algorithms were tested on two different reinforcement cages using the laboratory prototype of the machine. The fabrication of the two cages was documented, among other ways, through video filming. A short film showing the fabrication has been posted on Youtube.

The most important result from the study is that it is possible, based on a digital model, to fabricate a reinforcement cage automatically with the help of a machine. The fact that a digital model is the input means that different reinforcement cages can be manufactured by the machine; and therefore standardized/simplified types or series production are not necessary. The algorithms calculate the robot movements necessary for manufacturing. This means that the original purpose of the project, to investigate whether automatic job-site fabrication of reinforcement cages is possible, is fulfilled.

The result of the project is a big step towards "flexible automation", i.e. that manufacturing takes place with small volumes and a large mix ("one-off production"), where the robots are controlled by algorithms based on a 3D model of what is to be built as opposed to being programmed, which is the normal procedure for steering and control of robots in the manufacturing industry today.

In summary, the project has been focused on control and steering of the industrial robots and what data should be used as input data for the control. Construction documents in the form of digital reinforcement models can in principle be used as input data, but since such models normally show the permanent reinforcement only, they need to be supplemented with, for example, mounting reinforcement. In today's construction documents, the mounting reinforcement is only reported using allowed diameters, concrete cover, etc. (the work of designing the mounting reinforcement is thus left to the skilled workers), but for fabrication with the help of industrial robots, it needs to be shown already in the construction documents, i.e. in the digital model.

The focus of the project has been on the control and steering of the robots. The development of the robotic tools (gripper, wire feed to the tying tool, fixture, etc.) has therefore only been developed to a level that has been suitable for the laboratory prototype. For a full-scale prototype, the robotic tools need to be further developed regarding robustness, service life, etc.

Important questions for future development work are how the production can be controlled, verified, and documented with the help of sensors (i.e. closing the loop), and how sensors can be used to manage deviations from the theoretical geometry of the individual rebars (for example, by rejecting a manufactured rebar in case of excessive deviations).

Another question for the continued research in the field of Automated Construction is how the results from the project can be applied to other construction activities (use-cases) and thus enable these to be automated.

INNEHÅLL

Förord

Sammanfattning

Summary

Innehållsförteckning

1. Inledning och bakgrund

2. Projektfaserna och deras respektive resultat

2.1 Förstudier

2.1.1 Demonstration och datorsimuleringar

2.1.2 Laboratoriestudier

2.1.3 Banplanering

2.2 Forskning- och utvecklingsprojekt

2.2.1 Doktorandprojekt vid MDU

2.2.2 Byggautomation – Armering

3. Resultat

4. Framtida forskning och utveckling

5. Spridning av resultat

Referenser¹

Referenser från ”doktorandprojektet”

Referenser från förstudierna

Övriga referenser

¹ Samtliga referenser har bifogats till slutrapporten utom slutrapporterna för SBUF-projekt nr 13666, 13745 och 13823.

1. Inledning och bakgrund

Armering installeras manuellt, oftast järn för järn och direkt i formen. Arbetet är tungt och tidskrävande. Ett sätt att underlätta detta arbete är att prefabricera armeringen till större enheter, ofta kallade armeringskorgar.

Skanska valde att arbeta med prefabricerad armering i en entreprenad ingående i Norra Länken-projektet. Armeringsenheterna tillverkades manuellt på arbetsplatsen, se Figur 1. Efter tillverkning lyftes de in i formarna med hjälp av kranar. En fråga som väcktes i samband med detta arbete var om armeringsenheterna skulle kunna tillverkas maskinellt i stället, eventuellt med användning av industrirobotar.



Figur 1. Stora armeringsenheter/korgar prefabriceras för en betongtunnel i Norra Länken-projektet utanför Stockholm. Korgarna tillverkades på en mallplan. De färdiga enheterna lyftes därefter in i formarna.

2014 kontaktade Skanska ABB för att diskutera frågeställningen. Idén bedömdes som intressant och beslut fattades om att påbörja en förstudie. ABB föreslog att Skanska i detta inledande skede skulle etablera ett samarbete med Robotdalen, ett kompetenscenter vid Mälardalens Högskola, vid denna tidpunkt finansierat av bland annat Vinnova och ABB.

2. Projektfaserna och deras respektive resultat

2.1 Förstudier

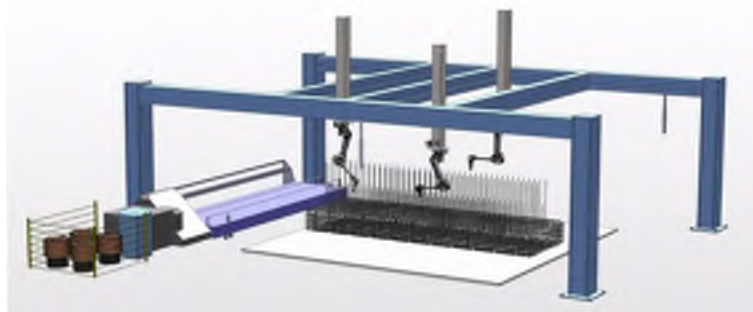
Förstudier genomfördes i tre etapper under åren 2015 – 2019. De omfattade:

1. Litteraturstudier, konceptstudier, datorsimuleringar och en första, mindre, demonstrator.
2. Fortsatta datorsimuleringar och provningar i laboratorium.
3. Inledande studier av banplanering

De inledande litteraturstudierna visade att det förekommer maskinell tillverkning av vissa typer av armeringsenheter såsom exempelvis svetsade nät och vissa standardiserade armeringskorgar. Maskinerna som har utvecklats för dessa armeringsenheter är specialbyggda för ett visst ändamål (såsom svetsade nät eller motsvarande). Det ska i sammanhanget nämnas att konceptet att tillverka prefabricerade armeringsenheter med hjälp av industrirobotar betraktades som intressant bland annat för att man kan tänka sig en större flexibilitet än vid användning av specialbyggda maskiner (som är byggda för vissa typer av armeringsenheter). Installation av armering är dock ett nytt tillämpningsområde för användning av industrirobotar. Forskning och utveckling pågår förvisso internationellt, bland annat vid ETH i Zürich, men är fortfarande i tidiga skeden i laboriemiljö.

De två inledande etapperna av förstudierna med litteraturstudier, konceptstudier, datorsimuleringar och provningar i laboratorium finansierades av Skanska och egeninsats av ABB genom Robotdalen.

Konceptstudierna bestod av en genomgång av förutsättningarna för att kunna montera armering med hjälp av industrirobotar. Armeringsenheterna (korgarna) är normalt sett stora i förhållande till robotarnas räckvidd. Detta innebär att det måste vara möjligt att flytta robotarna till den position där de ska hämta armeringsjärnen respektive den punkt där de ska placera dem. Armeringsjärn har liten böjstyvhet. Detta innebär att de måste hållas i minst två punkter när de ska flyttas. Robotar kan arbeta koordinerat, en viktig egenskap när de ska samarbeta för att flytta ett armeringsjärn. Att släppa och greppa om ett armeringsjärn under ett monteringsmoment är olämpligt, framför allt på grund av järnens deformationer. För fixeringen av armeringsjärnen (i projektet tillämpades najning) behövs därför en tredje robot. Robotarna kan byta verktyg vilket innebär att ett byte mellan tex najning och svetsning är möjligt. Konceptstudiens slutsats var att en gantry-konstruktion med rörliga bommar på vilka robotarna monterades var en lämplig lösning, se Figur 2. Denna typ av lösning används även för andra applikationer där robotar används och behöver flyttas mellan olika positioner för att utföra olika uppgifter.



Figur 2. Gantry-konstruktion med rörliga bommar på vilka robotarna är monterade. Konceptet medger att robotarna kan röra sig dels i horisontalplanet, dels i vertikalled.

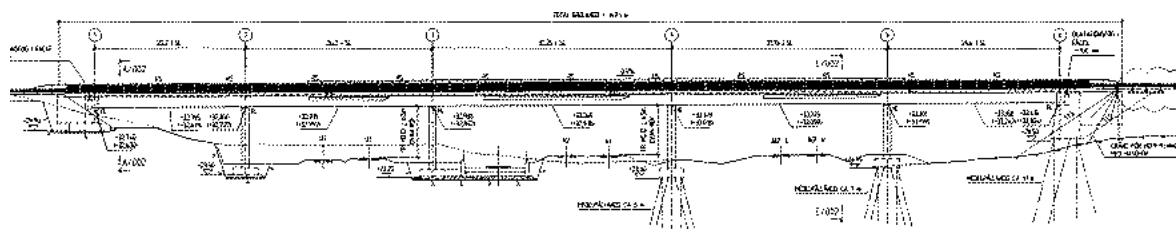
Nästa frågeställning var hur robotarna skulle styras. För att kunna studera detta sökte projektgruppen medel från SBUF för den avslutande delen av förstudierna med så kallad banplanering [13].

Flera examensarbeten genomfördes som del av förstudierna se ref. [6] tom [12]. I ref. [12] redovisas en försöksserie där utmattningskapaciteten hos robotsvetsad armering provas och jämförs med den beräkningsmässiga kapaciteten redovisad i Eurokoderna. Studien genomfördes i form av ett examensarbete och delfinansierades av SBUF.

2.1.1 Datorsimuleringar och demonstration

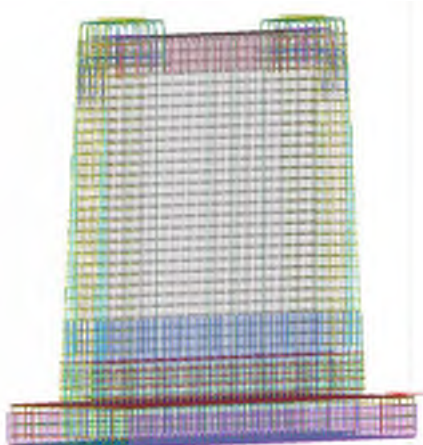
Den första etappen omfattade datorsimuleringar i RobotStudio (ABB) och en mindre demo där korta armeringsjärn monterades i en jigg och najades ihop av en robot.

För datorsimuleringarna användes armeringen i bottenplattan i stöd 4 i bro för Slammertorpsvägen (Mälarbanan) som Skanska precis hade färdigställt. En elevation av bron visas i Figur 3.



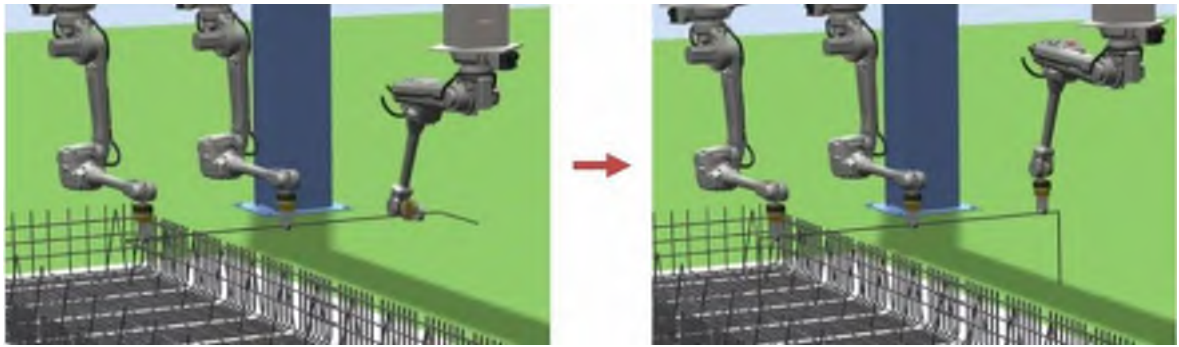
Figur 3. Elevation av bro för Slammertorpsvägen (Mälarbanan).

Armeringen i bron hade modellerats i 3D i Tekla. Armeringen i stöd 4 visas i Figur 4.



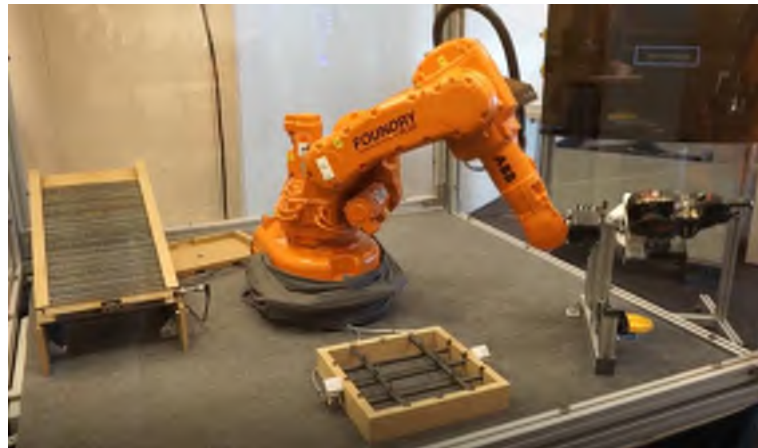
Figur 4. 3D-modell av armeringen i bro för Slammertorpsvägens stöd 4.

Med hjälp av datorsimuleringarna kunde viktiga förutsättningar för robotarnas positioner studeras. Ett exempel på detta visas i Figur 5. Undersökningarna var en viktig förutsättning för att kunna avgöra dels hur verktygen (gripverktygen respektive najningsverktyget) skulle ansättas, dels hur armeringsjärnen skulle greppas beroende på järnets slutposition i armeringskorgen.



Figur 5. Simuleringar (RobotStudio) med tre samverkande robotar. Här visas betydelsen av att robotarna "greppar" armeringsjärnen på ett lämpligt sätt med tanke på deras slutliga position i armeringskorgen. Detta är viktigt eftersom det inte är lämpligt att ändra hur robotarna greppar armeringsjärnet ("omgreppning") under förflyttning från "hämta-positionen" till järnets slut-position i korgen.

Robotarnas förmåga att hämta och därefter placera ett armeringsjärn i en given position liksom att byta verktyg provades i en mindre demonstrator med en ensam robot, se Figur 6.



Figur 6. Den första demonstratorn (2015) med en robot som placerar 6 korta armeringsjärn i en jigg, byter verktyg till en najomat och najar ihop järnen. När de 6 armeringsjärnen har najats ihop flyttar roboten "armeringsnätet" åt sidan så att nästa "nät" kan byggas.

2.1.2 Laboratoriestudier

I den andra etappen av förstudierna genomfördes provningar i laboratorium. Valet föll på Robot Application Center (RAC) i Eskilstuna där en demonstrator i skala 1:2 byggdes upp, se Figur 7. Demonstratorns utformning medgav att robotarna kunde röra sig i horisontalplanet men inte vertikalt.

Den andra etappen avslutades med att ett så kallat proof of concept (PoC) presenterades i inledningen av 2018. Här konstaterades att det är möjligt att montera armeringsjärn med hjälp av industrirobotar.

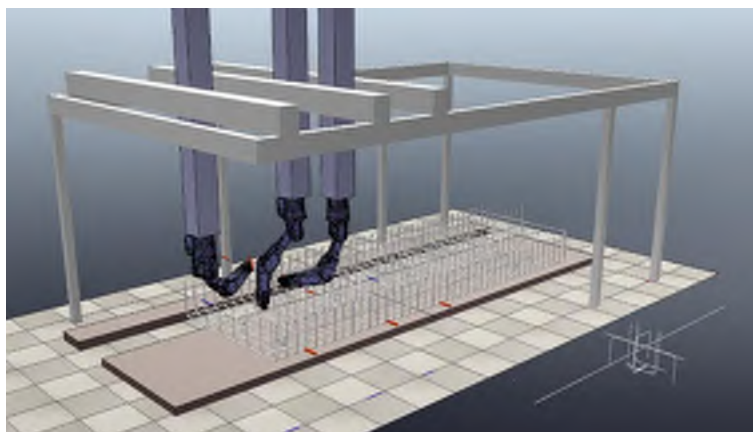


Figur 7. Den första versionen av demonstratorn i laboratoriet i Robot Application Center (RAC) i Eskilstuna. Demonstratorn har tre robotar som hänger i bommar (tvärgående balkar) som kan röra sig utmed två längsgående balkar. Robotarna kan därmed röra sig i x- respektive y-led. I denna version av demonstratorn kunde robotarna inte röra sig i z-led (vertikalt).

2.1.3 Banplanering och flexibel automation

Efter de inledande studierna där det konstaterades att det tänkta konceptet hade en lämplig utformning för att kunna tillverka armeringskorgar, var nästa steg att utveckla en metodik för att kunna styra robotarna. Att programmera dem för varje armeringskorg är inte en möjlig lösning på grund av ett mycket omfattande programmeringsarbete. Alla nödvändiga robotrörelser måste i stället kunna beräknas för att armeringsstationen skulle kunna bli automatisk. Man kan i detta sammanhang tala om flexibel automation, dvs att det snabbt går att ställa om produktionsapparaten att tillverka en viss produkt till en annan. Genom att armeringsstationens robotrörelser beräknas kan den ställas om till att tillverka en annan armeringskorg redan efter att ha tillverkat ett (1) exemplar av den första korgen. Utvecklingen av algoritmerna för denna typ av beräkningar tog utgångspunkt i armeringsjärnets bana från hämta-positionen till slutpositionen. Armeringsjärnets slutpositioner är definierade i den digitala modellen av korgen. När denna bana bestämdes måste kollisioner undvikas mellan armeringsjärnen i korgen och mellan armeringsjärnen och robotarna/gantryn. Detta måste göras i varje steg av tillverkningen eftersom det i varje steg tillkommer ett armeringsjärn. Hänsyn till den aktuella tillverkningsstatusen måste därmed tas i varje nytt steg.

Det visade sig att arbetet med banplaneringen kunde förenklas om robotarna kunde röra sig i vertikalled så som konceptet ursprungligen var tänkt. I simuleringarna i CoppeliaSIM i denna etapp av arbetet kunde därför robotarna även röra sig vertikalt, se Figur 8.



Figur 8. Datorsimulering av banplanerings-algoritmerna i CoppeliaSIM. I denna simulering visas hur robotarna kan röra sig i såväl x-, och y-led som i z-led.

2.2 Forsknings- och utvecklingsprojekt

Ref [1] sammanfattar arbetet under förstudieperioden 2015 – 2019. Viktiga frågeställningar för fortsatta studier sammanfattades i följande fyra punkter:

- Bestämning av installationsordningen för de olika järnen i armeringskorgen
- Bestämning av robotbanor för placering av ett armeringsjärn i korgen.
- Bestämning av robotbanor för att naja fast ett armeringsjärn
- Övergång till verkliga förhållanden

Den sista punkten, övergång till verkliga förhållanden, baserades på erfarenheterna från laboriestudierna under förstudieperioden som tydligt visade att det var viktigt att kunna prova metodiken i laboratorium.

2.2.1 Doktorandprojekt vid MDU (tidigare MDH)

Ett doktorandprojekt genomfördes under perioden 2019 – 2023, dvs parallellt med seniorforskarprojektet Byggautomation – Armering, beskrivet i avsnitt 2.2.2 nedan. Doktoranden Mahdi Momeni genomförde sitt doktorandarbete som högskoledoktorand inom forskarskolan ARRAY vid MDU. Professor Thomas Nolte leder och ansvarar för forskarskolan.

Handledning av doktorand Momeni gjordes av professorerna Alessandro Papadopoulos och Thomas Nolte vid MDU. Seniorforskarna inom projektet Byggautomation – Armering, Johan Relefors, Ulf Håkansson, Lars Pettersson och Ingemar Reyier deltog också i handledningen.

Mahdi Momeni har ännu inte avlagt licentiat-examen. I stället hänvisas i denna slutrapport till de artiklar som tagits fram inom ramen för projektet. Som framgår av referenserna [1] tom [5] har seniorforskarna inom projektet Byggautomation – Armering deltagit som medförfattare.

2.2.2 Seniorforskarprojektet Byggautomation - Armering

För att kunna studera de olika frågeställningar som framkommit under förstudieperioden beslutades att söka forskningsmedel från Vinnova, genom SIP InfraSweden2030. Projektgruppen som sökte medel bestod av Skanska (Ulf Håkansson och Lars Pettersson) med konsult Robotdalen AB (Erik Hellström, Johan Relefors och Anders Thunell), ABB

(Ingemar Reyier) och Husqvarna (Martin Huber). Husqvarna deltog i denna fas med najningsverktyget Knut39, se ref [15]. Projektet genomfördes under perioden 2020-08-01 tom 2023-07-31.

Forskningsfrågan som formulerades för projektet var:

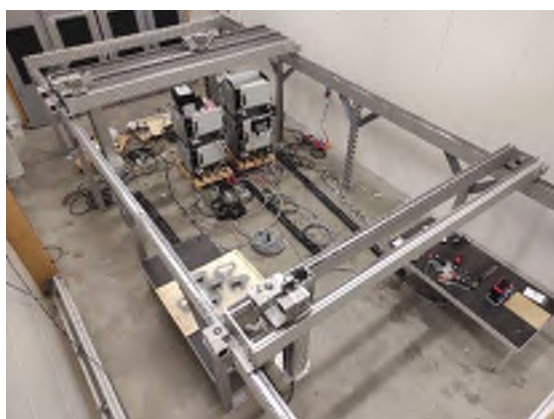
Är det möjligt att tillverka en armeringskorg med hjälp av industrirobotar? Om det är möjligt, kan det göras automatiskt?

Projektet delades in i fyra arbetspaket (AP):

AP1. Demonstrator (skala 1:2)

Arbetspaketet omfattade att bygga om den prototyp (demonstrator) av armeringsstationen som användes i förstudierna med rörelsemöjlighet för robotarna i z-led. Prototypen förlängdes också för att kunna rymma armeringskorg nr 1 och 2 (se avsnitt AP2 nedan) i skala 1:2. Robotverktygen utvecklades inom projektet endast till den nivå som krävdes för den automatiska tillverkningen i laborierprototypen. Frammatning av armeringsjärnen till robotarna (som till del studerades i projektets förstudier) behöver också undersökas vidare för en fullskalaprototyp.

Armeringsstationen projekterades således om med en vertikal "axel" för att möjliggöra att robotarna skulle kunna röra sig i vertikalled. I Figur 9 monteras en av robotarna på en sådan axel. Armeringsstationen byggdes denna gång upp i en lokal i Västerås.

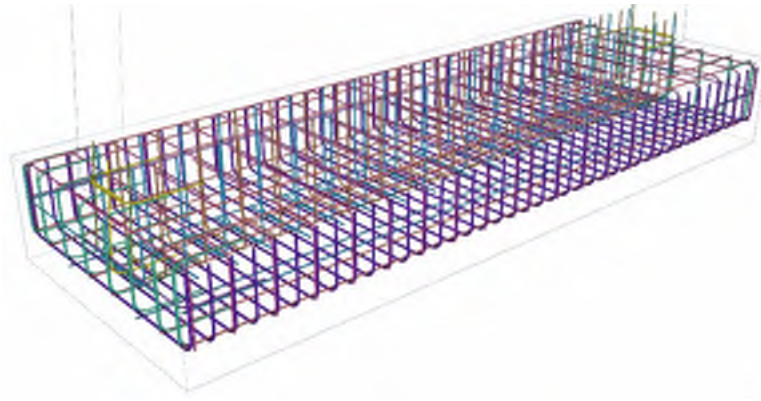


Figur 9. Bilder från uppbyggnaden av armeringsstationen i laboriet i Västerås. Till höger monteras en robot på Z-axeln (av Anders Thunell t.v. och Ingemar Reyier) som möjliggör att roboten kan röra sig i vertikalled.

AP2. 3D BIM-modell ("digital tvilling")

Vid planläggningen av projektet var utgångspunkten att fyra olika korgar skulle byggas. Det stod dock snart klart att det viktigaste var att studera detaljer i hur varje enskilt järn installerades och att kunna avgöra om algoritmerna för att bestämma installationsordningen fungerade för två till karaktären olika armeringskorgar. Därför bestämdes att projektet skulle fokusera på två korgar i stället för de ursprungligen fyra tänkta korgarna.

Armeringskorgen från förstudierna användes som korg nr 1. Den digitala modellen av armeringskorgen visas i Figur 10.



Figur 10. Armeringskorg nr 1. Korgen är densamma som användes i förstudierna.

Efter det att den digitala modellen² av korgen hade färdigställts användes den för att beställa armeringen från Celsa (armeringsleverantör). Den byggdes sedan manuellt för att på så sätt kontrollera och verifiera att armeringsjärnen var korrekt modellerade. I Figur 11 visas den nästan färdigbyggda korg nr 1.



Figur 11. Korg nr 1 byggdes manuellt på Skanskas arbetsplats i Kungens kurva. Den färdiga korgen transporterades sedan till laboratoriet i Västerås. Fotot visar hur de sista järnen najas fast av Abubakar Kathry, projektingenjör på Skanska.

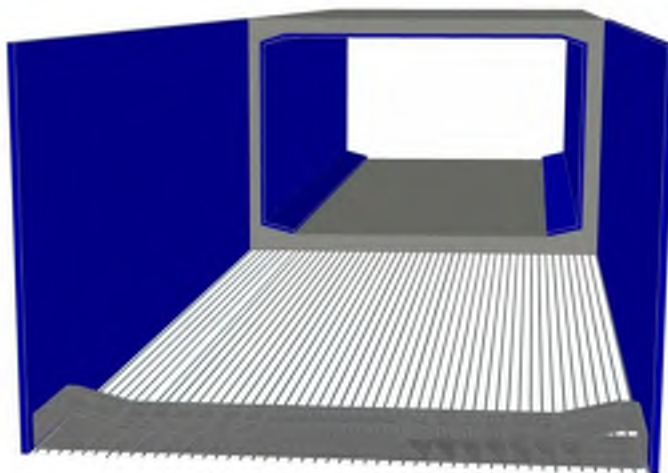
Armeringskorg nr 2

Skanska lämnade ett anbud på entreprenaden ”Mälarbanan, Solna – Sundbyberg (E9961)” under hösten 2018. Projektet bestod bland annat av att placera järnvägen genom

² Ett examensarbete genomfördes vid LTU där frågan om hur en digital modell av en armeringskorg kan överföras till ett beräkningsprogram studerades [14]. Bakgrunden till denna undersökning var att de färdigbyggda korgarna är tänkta att lyftas in i formarna med hjälp av kran. Det är därför viktigt att konstruktören, under projekteringen, kan kontrollera hur korgen ska lyftas.

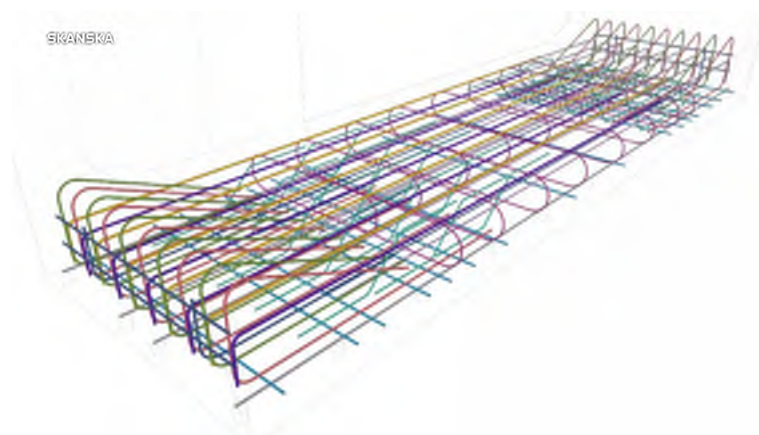
Sundbyberg i betongtunnel. Skanska föreslog i anbudet att armeringskorgar för tunneln skulle tillverkas med hjälp av industrirobotar. Entreprenadformen var tidig entreprenörsmedverkan (TEM) med en uppdelning i två faser, projektering och utförande.

Skanska vann upphandlingen av fas 1, projektering³. Planer togs fram för hur det automatiserade arbetet skulle utföras med hjälp av armeringsstationen och hur denna skulle utformas. För att minimera sprickbildningen var planen att hela tvärsnittet, golv, väggar och tak, skulle gjutas i en enda etapp om 25 meter.



Figur 12. Skanskas förslag till utformning av betongtunneln för Mälarbanan genom Sundbyberg. Idéskiss prefabricerad armeringskorg i förgrunden.

Inom ramen för projektet detaljprojekterades armeringen för typiska tvärsnitt av betongtunneln. Baserat på denna detaljprojektering togs armeringskorgar fram för tunneltvärsnittet. Armeringskorgen för tunnelns bottenplatta valdes ut som korg nr 2, se Figur 13.



Figur 13. Projekterad armeringskorg för betongtunneln för Mälarbanan i Sundbyberg. För att få en realistisk armering i korgen dimensionerades betong och armering i tunneltvärsnittet.

³ Skanska deltog endast i den första fasen av projektet, där man i samverkan med Trafikverket skulle komma överens om utformningen samt en rikt kostnad för byggandet. Projektet är nu uppskjutet och en ny byggstart är planerad till tidigast 2028, beroende av när plan- och tillståndprocesserna blir klara.

Även korg nr 2 byggdes manuellt. Detta gjordes, på samma sätt som för korg nr 1, för att kontrollera och verifiera modelleringen och installationsordningen.



Figur 14. Foto från det manuella byggandet av korg nr 2.

AP3. Banplanering och kollisionskontroll⁴

Banplanering

Projektet fokuserades inledningsvis på banplaneringen. Installationsordningen för järnen bestämdes i detta skede manuellt. Detta gjordes för båda korgarna inklusive en komplett parametrisering med en fullständig definition av geometrin, inklusive geometrin för verktygens positioner vid installation av de olika järnen. Detta arbete (i detta skede manuellt) gjordes som underlag för utvecklingen av algoritmerna för beräkning av armeringsjärnets banor och de tillhörande robotrörelserna (banplaneringen). Algoritmerna för beräkning av robotrörelserna måste innehålla rutiner för kollisionskontroller och dessa måste kunna ta hänsyn till att armeringskorgen har ett nytt utseende efter det att ett nytt armeringsjärn har monterats.

Demonstratorn var mycket viktig för utvecklingen av algoritmerna för banplaneringen i och med att dessa kunde provas praktiskt, se Figur 15.

⁴ Johan Relefors valde att, efter ungefär halva projektiden, arbeta under eget namn (Enodo Robotics) som underkonsult till Robotdalen AB. Klas Kronander, också Enodo Robotics, anslöt samtidigt till projektgruppen.



Figur 15. Utprovning av algoritmerna för banplaneringen. I figuren visas två robotar som håller i ett C-järn medan den tredje roboten najar fast järnet.

Installationsordning

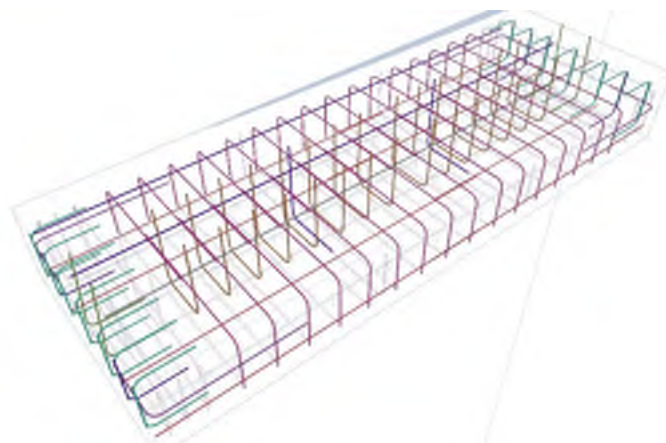
En viktig fråga i projektet var att armeringsstationen skulle vara helautomatisk. Detta innebär att den förutom att kunna beräkna banorna för de enskilda armeringsjärnen även måste kunna bestämma installationsordningen för järnen. För att kunna betraktas som helautomatisk måste installationsordningen kunna bestämmas för armeringskorgar med olika uppbyggnad. Som framgår av bilderna ovan är de två korgarna i projektet uppbyggda på olika sätt. Viktigt att notera är att korg nr 2 även är tvärkraftsarmerad. Denna typ av armering försvårar bestämningen av installationsordningen. Det var därför viktigt att kunna prova algoritmerna för installationsordningen för en sådan korg.

Teoretiskt skulle det kunna vara möjligt att använda algoritmerna för beräkning av robotrörelserna för att bestämma installationsordningen eftersom dessa inkluderar rutiner för kollisionskontroller. Algoritmerna skulle därför kunna användas för att ”prova sig fram” till en installationsordning. Metodiken är dock bara teoretiskt möjlig eftersom antalet möjliga installationsordningar är $N!$ (fakultet) där N är antalet järn i korgen.

Arbetet med utveckling av algoritmerna för robotbanorna visade dessutom att beräknings tiden är alltför lång för att kunna använda dessa för att prova sig fram till en installationsordning. Det krävs därför att antalet installationsordningar som ska provas med hjälp av algoritmerna för banplaneringen minimeras. Detta leder till frågan om vilka kriterier som ska användas för att minimera antalet kandidater för installationsordningen och att kunna göra detta snabbt.

I litteraturen används ofta begreppet ”montera ihop genom att montera isär” när det gäller utveckling av metodik för att bestämma installationsordningar. Det bestämdes att använda denna metodik vilket innebär att den kompletta armeringskorgen plockades isär. Den ordning som järnen plockades bort från korgen blev sedan i omvänd ordning installationsordningen.

Ett sätt att identifiera de järn som går att plockas bort är att använda så kallad repulsiv potential. Den repulsiva potentialen (mellan järnen) ger ett antal järn som kan tas bort från korgen för varje status som korgen har när den plockas isär, jämför Figur 16. Den repulsiva potentialen kommer samtidigt identifiera järn som är i vägen för att ett visst järn ska kunna plockas bort. Om inget järn är i vägen kan med andra ord järnet plockas bort.

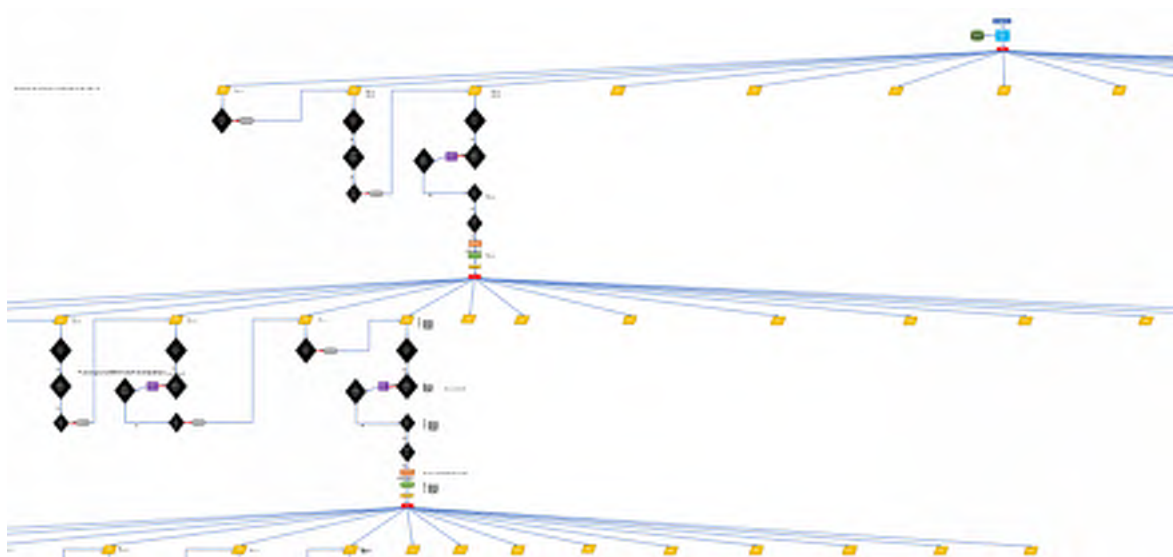


Figur 16. Figuren visar status för korgen efter det att ett antal armeringsjärn har plockats bort. Repulsiv potential användas på nytt för denna status för att identifiera ytterligare järn som kan plockas bort. Principerna används för varje ny status till dess att samtliga järn har kunnat plockas bort.

De manuella studierna av installationsordningen visade att det oftast är flera olika järn som kan plockas bort i ett visst skede. Resultatet av detta blir ett sökträd, se Figur 17 och Figur 18. De situationer som uppstår måste hanteras med att ytterligare kriterier provas på de järn som kan plockas bort. Sådana kriterier inkluderar exempelvis provning av möjliga verktygspositioner. Denna typ av kriterier är inte beräkningsintensiva och gör därför att ett mindre antal möjliga kandidater för installationsordningen snabbt kan tas fram varefter banplaneringen kan provas på dessa kandidater. Så snart en kandidat befunnits vara OK, avbryts sökningen.



Figur 17. Figuren visar de inledande delarna i sökträdet med den digitala modellen, extrahering av geometriska data från modellen, databas för korgens status när det plockas isär och det första steget med repulsiv potential.



Figur 18. Med repulsiv potential identifieras ett antal armeringsjärn som kan plockas bort från korgen. Dessa järn analyseras i sin tur med ett antal kriterier för att avgöra om de kan utgöra kandidatjärn för att plockas bort i den aktuella statusen för korgen. Korgen analyseras på samma sätt för varje ny status vilket leder till en kandidat för installationsordningen.

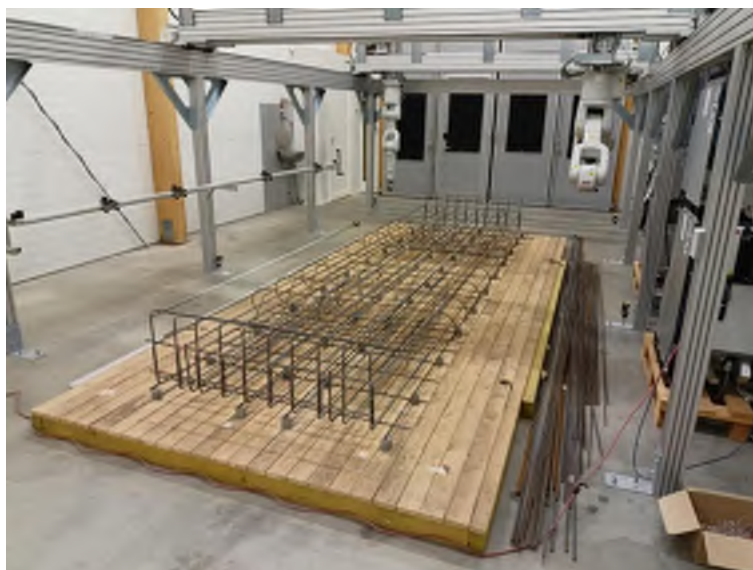
AP4. Demonstration

I det fjärde arbetspaketet genomfördes demonstration av att det är möjligt att automatiskt tillverka armeringskorgar med hjälp av industrirobotar. Demonstrationen genomfördes dels genom att bygga korg 1 respektive 2 med armeringsstationen, se Figur 19 och Figur 20, dels genom demonstrationer för Skanskas organisation och Trafikverket med flera.

Byggandet av korg nr 1 och 2 videofilmades. En kort videofilm laddades upp på Youtube [16] (se även kapitel 3 nedan).



Figur 19. Korg nr 1 färdigbyggd med hjälp av armeringsstationen. Ingemar Reyier konstaterar att korgen är stabil.



Figur 20. Korg nr 2 färdigbyggd med hjälp av armeringsstationen.

3. Resultat

Det viktigaste resultatet från studien är att det är möjligt, utgående från en digital modell av den armeringskorg som ska tillverkas, att göra detta automatiskt med hjälp av en maskin. Att en digital modell utgör indata innebär att olika armeringskorgar kan tillverkas av maskinen; och det därmed inte är nödvändigt med standardiserade/förenklade typer eller serietillverkning. Algoritmerna beräknar de robotrörelser som är nödvändiga för tillverkningen. Detta innebär att det ursprungliga syftet med projektet, att undersöka om automatisk arbetsplatstillverkning av armeringskorgar är möjligt, är uppfyllt.

4. Framtida forskning och utveckling

Viktiga frågeställningar för framtida utvecklingsarbete är dels hur tillverkningen kan kontrolleras, verifieras och dokumenteras med hjälp av sensorer, dels hur sensorer kan användas för att hantera avvikelser från den teoretiska geometrin för det enskilda järnet (till exempel genom att förkasta ett tillverkat järn vid allt för stora avvikelser).

En viktig frågeställning för den fortsatta forskningen inom området Byggautomation är hur resultatet från projektet kan tillämpas för andra byggaktiviteter och därmed möjliggöra att även dessa kan automatiseras.

5. Spridning av resultat

Ett flertal kanaler har använts för att sprida resultatet från projektet.

Presentationer av resultat från föreliggande SBUF projekt och det övergripande projektet Byggautomation – Armering har hållits i flera olika forum. Nedan följer exempel där projektet har presenterats och diskuterades under åren 2021–2023.

- Nationellt Nätverk för Byggautomation, KTH, maj 2021 – temadag Byggautomation
- ETFA 2021, sept 2021 – keynote lecture, Lars Pettersson
- Byggforum, okt 2021 – Marriott hotell Stockholm, Ingemar Reyier och Ulf Håkansson
- Nordic Contech, dec 2021 – “Robotisering möjliggör framtidens byggande”, inspelad intervju (moderator: Fredrik Bauer)
- KTH Transformation Day, dec 2021 – ”Automatiserat byggande är framtiden”
- Automation Region, Västerås, mar 2022 – inspelad intervju
- Trafikverket, april 22. Demonstration för ledningen av Sundbybergsprojektet (se avsnitt 2.2.2 ovan).
- Digitalize in Stockholm, okt 2022 – “Smart Construction is needed to achieve a better and safe working environment”, Digital Futures, KTH
- Tyréns Innovation, nov 2022 – ”Innovationer – på vägen till hållbarhet” (moderator: Aurore Belfrage)



- SiQ, Göteborg dec 2022 – Quality Innovation Award, Lindholmen Science Park, Göteborg. Projektet erhöll här ett delat första pris, se bild nedan.



- Sweden Innovation Days, mar 2023 – “Enabling innovation that makes a difference”, InfraSweden2030, Vinnova
- Future of Construction, TU München, sep 2023 – presentation av Skanska och ABB för fakultet och elever

- ARRAY Summit, okt 2023, presentation av pågående projekt inom ARRAY
- Ny Teknik Education, okt 2023 – “Smarta städer och framtidens transportinfrastruktur”
- Projektet presenterades vid Industrialized Construction Forum vid Stanford University (CA, USA) den 7:e februari 2024.



Ett antal filmer som dokumenterar arbetet och resultaten har lagts upp på Youtube:



https://youtu.be/yOfLH-srv1M?si=tkj3nAz_sE3bk67w



https://youtu.be/o9TOAa5g_Zo?si=rRinnMtLQT9w-fl

Genom den öppna och transparenta redovisningen av projektet, med tex filmer på Youtube, så har det erhållit stort intresse inte minst internationellt. Företag som Samsung (Sydkorea), Kajima (Japan) och Raise Robotics (USA) har kontaktat projektet för att erhålla mer information och diskutera ett eventuellt framtida samarbete.

REFERENSER

Doktorandprojektet

- [1] Relefors, Momeni, Pettersson, Hellström, et al., Towards Automated Installation of Reinforcement Using Industrial Robots, ETFA conference paper 2019.
- [2] Relefors, Momeni, Pettersson, Papadopoulos et al., Installation Order in Automatic Fabrication of Reinforcement Rebar Cages, ETFA conference paper 2021.
- [3] Momeni, Relefors, Kathry, Pettersson, et al., Automated fabrication of reinforcement cages using a robotized production cell, Automation in Construction 133 (2022).
- [4] Momeni, Relefors, Pettersson, Papadopoulos, et al., On the Bar Installation Order for the Automated Fabrication of Rebar Cages, ISARC conference paper 2022
- [5] Momeni, Relefors, Pettersson, Papadopoulos, et al., On Finding an Installation Order for the Reinforcement Bars Used in Concrete Structures - An Algorithmic Approach, submitted to Automation in Construction for peer review 2023.

Referenser från förstudierna

- [6] Folkesson, P., Lönnroos, R. (2018). Construction Automation – Assessment of State of the Art and Future Possibilities. Master thesis, MDU.
- [7] Sandegren, A., Viström, E. (2017). Development Project of a Robotic Tool for an Automated Rebar Cage Assembly Station. Master thesis, MDU.
- [8] Ahrel, M., Larsson, M. (2018). Flexibel fixturering av armeringsjärn för robothantering. Examensarbete, MDU.
- [9] Persson, J. (2018). Flexibelt gripdon för automatiserad hantering av armeringsjärn. Examensarbete, MDU.
- [10] Bengtsson, P. (2018). Utveckling av monteringsbar Automationsstation. Examensarbete, MDU.
- [11] Staudinger, S. (2018). Physics Engine for simulation of dynamic behaviors in rebars. Master Thesis, University of Applied Science, Vienna.
- [12] SBUF 13745 Byggautomation – Utmattningshållfasthet hos robotsvetsad armering (2019).
- [13] SBUF 13666, Byggautomation - Banplanering och demonstrator för robottillverkade armeringskorgar (2021).

Övriga referenser

- [14] Larsson, A. Pettersson, M. (2021). Automated Construction - Reinforcement Lifting Prefabricated Reinforcement Cages. Master thesis, LTU.
- [15] SBUF 13823, Najningsverktyg för industrirobot (2022). Skanska Teknik.
- [16] Youtube “Flexible automation – The future of reinforcement installation” (2022) (resultat från projektet Byggautomation – Armering). Se länk ovan.

Towards Automated Installation of Reinforcement Using Industrial Robots

Johan Relefors¹, Mahdi Momeni², Lars Pettersson^{2,3}, Erik Hellström¹,
Anders Thunell¹, Alessandro V. Papadopoulos², and Thomas Nolte²

¹Robotdalen AB, Västerås, Sweden

²Mälardalen University, Västerås, Sweden

³Skanska Sweden AB, Stockholm, Sweden

Abstract—The construction industry is today among the least automated industries with a long tradition of utilizing manual labour. Despite the potential benefits of automation, only a few examples of using robots to automate (parts of) construction have been presented over the past years. In this paper we present our ongoing work towards automated installation of reinforcement, a traditionally very heavy and labour intensive work. We use industrial robots and we discuss the potential benefits and challenges of such robotic automation in construction. Our overall goal is to achieve a fully automated robotic solution for flexible serial production of custom made non-identical reinforcement cages. In the paper we highlight and analyse the main challenges that must be addressed in order to reach a functioning and efficient solution.

I. INTRODUCTION

Employment and application of robots in various production tasks has in recent years gained increasing interest in manufacturing industries. The number of robots deployed worldwide is estimated to increase to about 2.6 million units by 2019. About 70% of them will be used in the automotive, electrical/electronics, and metal and machinery industries¹. There are also considerable research and development efforts in this field. While there are initiatives towards automation in the construction domain both in research [1]–[4], and in industry, e.g., Built robotics², or MX3D³, the overall trend has not been reflected in the construction industry.

One key difference between the construction industry and other industries with higher degrees of automation, like manufacturing industries where robots have been extensively employed, is that construction projects are typically one of a kind. This means that less time can be put into product-specific automation and more time is spent on changeovers. Furthermore, each structure is unique in its details, thus automated solutions require special and careful considerations.

While construction projects present challenges for automation, the gains are potentially large [4]. Moreover, work in the construction industry is often strenuous and happens under hazardous and harsh conditions. This is reflected in a high



Fig. 1. Down-scaled system.

risk for work accidents. The above-mentioned, as well as other issues, create a huge potential need for utilizing automation techniques in the construction industry, with a promise for increased safety and efficiency, as well as reduced costs. In this work, we address automation of rebar cage (reinforcement) fabrication, looking in particular towards civil engineering structures. In particular, we consider three industrial robots hanging on a gantry for the installation of rebars, see Fig. 1. Since each and all rebar cages are unique in their details and are designed for a particular structure, we aim for flexible serial production. Therefore, the challenge is to automate the process that goes from the design of the 3D digital (CAD) model to the construction of the reinforcement cage, exploiting the described robotic system. Such process presents several challenges, described in this paper, ranging from the task and path planning for the robots, and the management of the flexible moving parts, and the coordination of the multi-robot system. In this paper, we describe and analyze these challenges, and we outline our research directions towards to address them.

II. PROBLEM STATEMENT AND MISSION

The aim of this work is to answer the question: *Is it possible to fabricate reinforcement rebar cages using industrial robots?* The question is interesting for many reasons. First, prefabricating rebar cages, regardless of method, has the potential to shorten build times. Second, is that automation would

This work was supported by the Knowledge Foundation with the Automation Region Research Academy (ARRAY) and SBUF.

¹<https://ifr.org/>

²<https://www.builtrobotics.com/>

³<https://mx3d.com/>

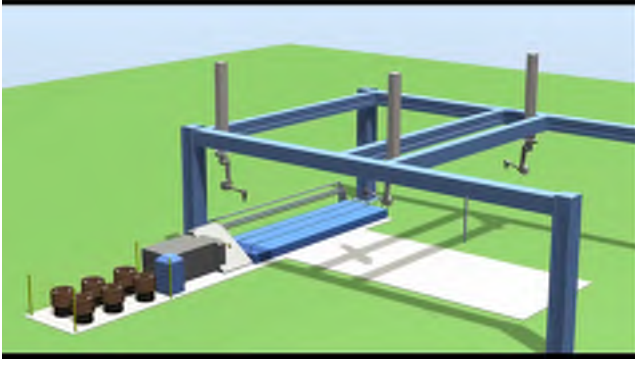


Fig. 2. Gantry robot systems simulation.

reduce the amount of heavy and hazardous manual work that current methods of installing reinforcement lead to. Finally, it is an interesting question to answer from an automation and production perspective. We started using simulations set up in ABB RobotStudio, along with experiments in the lab. In RobotStudio, the construction of a rebar cage used in bridge construction was simulated. We also simulated the construction of a simplified down-scaled rebar cage, which was later built in a lab setting (see Fig. 1). In the lab we used three ABB IRB1200 robots hanging upside down, mounted on a gantry robot with two degrees of freedom for each robot (see Fig. 2). We did this both by manually programming the gantry robot paths and by generating its paths from rebar and tie point coordinates.

To be able to build the rebar cages in the lab, tools had to be developed. A special tool for rotating a rebar without moving the robot is used in this setting, and it simplifies the programming of the robot paths. A tool for tying rebars together was also constructed, by adaption of a manual tie gun. The tying tool was not good enough for production.

In this paper, we aim at building rebar cages using robots hanging from the gantry further, based on our experience from the previous set-up. A goal that we have set is to develop software which takes a CAD-model of a rebar cage as input, and produces robot paths for building the rebar cage, using the gantry-robot system, as output, see Fig. 3. We also want to test the generated paths on a physical system. The reason that we need to generate the robot paths, instead of programming them by hand, is that rebar cages used in civil engineering and building structures are unique. The reason that each case is unique is that they are designed to the precise dimensions and the precise loads at a given location in the structure.

III. CHALLENGES

There are several challenges that need to be tackled for the automated construction of rebar cages. The problem can be split into four major challenges: (i) rebar installation order, (ii) path planning for placing rebars, (iii) path planning for tying rebars, and (iv) transitioning to the real world.

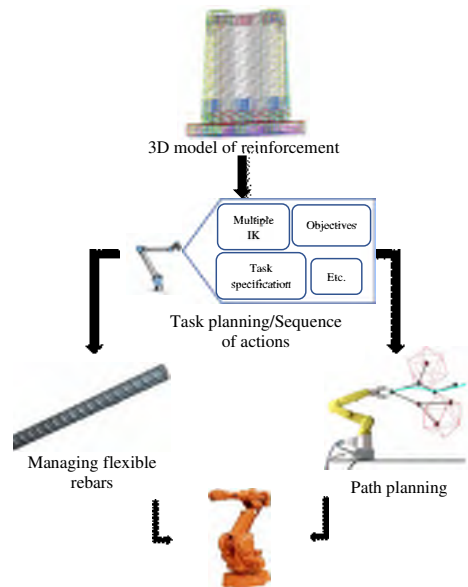


Fig. 3. Overall process scheme.

A. Rebar installation order

The first challenge concerns the ordering in which the rebars must be placed, i.e., how to generate a valid order based on a CAD-model of the final rebar cage. Finding such an order is a challenging problem given the fact that there are often more than 100 rebars to place, meaning that a pure combinatorial search is not possible. Task planning approaches will be considered, e.g., [5], focusing on heuristics able to provide sub-optimal yet feasible solutions.

For example, the ordering problem can be addressed by observing that the positions where rebars are to be placed are most likely often more constrained than the positions where the rebars must be picked. Backward chaining approaches can be helpful in addressing such complexity [6]. More specifically, given the target 3D CAD-model of the fully constructed cage we determine where to start, and we iteratively compute the gantry robot motions to remove all the rebars to disassemble completely the structure. As noted above, this leads to a very large search space. Ideally, we would like to disqualify all of the non-working orderings without computing any actual robot motions. If that is not possible we would at least like to limit the actual robot motions that we need to compute. One way of lowering the number of robot motion computations needed is to apply some heuristics to disqualify certain sequences. For example, consider a rebar which can move on its own. If, in this simplified problem, the rebar cannot be removed from the cage then it will not be possible when adding the complications of the gantry, robots and tools. One way of implementing this idea is to apply a repulsive potential between the rebar which we are currently trying to remove and all other rebars, similarly to what is done with obstacle avoidance in potential field methods [7]. If, as a result of the force from the potentials, the rebar moves away

from all other rebars with some clearance, then it might be possible to remove using a robot. Otherwise, we can safely say that it cannot be removed yet. Another idea to reduce the number of possible orderings is to try to introduce precedence constraints among the rebars [5]. The basic idea is then that some rebars cannot be attached to the cage before others are already in place. A wrong ordering in this case could mean that a rebar is floating freely, not attached to anything, or that there are not enough tie points available given the current cage to tie the given rebar into place.

By using ideas like the ones above, the ordering can be solved as a separate problem. However, being able to remove the rebar from the cage and finding that it can be attached to the cage is only part of the problem, the rebar must also be tied to the cage. This step will affect the possible valid orderings. Again, we might not need to try to compute the full tie path to disqualify an ordering. It would be enough to show, for example, that no robot can reach the tie position.

To finish this section we point out that not every rebar cage is possible to build using the setup we have in mind. A human might temporarily bend a rebar ever so slightly to fit it over some structure, something which is more difficult to achieve with robots. Another example is that human are very good at re-grasping whereas when a robot holds a rebar in a well defined grip it is most likely not a good idea to let go of that grip. The reason being that any re-grasping will most likely not produce the same level of precision as grasping in a fixture, where the piece to be picked up is fixed in a well defined position. Another thing humans do at a construction site is to adapt to incomplete drawing. Rebar cage drawings are most often incomplete in the sense that the people building the cages are expected to add (temporary/support) rebars that will make the structure possible to build.

B. Path planning for placing rebars

In this section, we assume that the rebars, the gantry and the robots are completely stiff, that is we completely ignore any deflection effects. The problem is then to pick up a given rebar, using given gripping points, from a fixture using one or more of the robots, move the rebar to its final position in the rebar cage and finally releasing the rebar and moving the robots away. In doing this, no collision is allowed. We assume that the rebar which is to be placed is part of a valid ordering. Also note that we do not consider the challenge of tying the placed rebar to the existing cage here, treated next.

When generating paths for the robots to solve a problem like this, where we can assume that the fixture is easily accessible and the final position is more difficult to reach, it is possible to still reason in backward chaining fashion. We can consider the case where the robot is supposed to remove the rebar from its position in the cage and place the rebar in the fixture. Given this choice we expect that removing the rebar from the cage is the difficult part of the problem and we will therefore limit the discussion to removing the rebar away from the cage.

There are several possible strategies to try to solve the problem of removing the rebar from the cage. We are currently

working along the lines of: (i) computing collision free robot configurations where the gripping robots are holding the rebar which is to be removed, or, (ii) computing a path for the system of robots and rebar which removes the rebar from the cage. Since we assume that it is possible to place the rebar in the rebar cage the first step should be fairly easy. It amounts to compute the inverse kinematics for the robot-gantry system with the constraint that there can be no collisions. Since each gantry robot system has 9 degrees of freedom (DOFs), methods for resolving the the robot redundancies are needed [8]. Alternatively, it is possible to place the gantry in a given location and then compute the inverse kinematics for the robot manipulator. Both of these methods can generate multiple possible robot configurations for each gantry-robot system. To find collision free paths, the possible configurations for each gantry-robot system can be tested for collision against each other until a collision free configuration for the full system is found. Collision-free motion can be included in the redundancy resolution of the robot, to reduce the number of possible configurations.

The second step, to compute a path for the system to remove the rebar from the cage, is equivalent to the extensively studied problem of robot path planning. One often used class of methods are randomness based methods based on the RRT/RRT* algorithm [9]–[11]. RRT/RRT* efficiently explore configuration space even for high dimensional problems. In our case we have a system consisting of 3 gantry-robot systems, each with 9 DOFs giving the full system 27 DOFs. To simplify the planning we note that in cases where one or more robots are not used, the computed plan only needs to keep the robot out of the way. Furthermore, when more than one robot holds the rebar there are constraints on the relative movements of the gantry-robot systems. For example, given that two robots are gripping the rebar in a fixed way (a grip which establishes a rigid transformation between the tool and the rebar) the number of DOFs is reduced from 18 to 12.

C. Tying the rebars

After placing a rebar in its correct position, it must be tied into place using a tying tool. The tying tool which we are currently using is a standard tying tool which has been adapted for robotic applications. The quality of the knots produced by this tying tool is probably not high enough and we are investigating alternatives. One possibility would be to make a combined gripping and tying tool. The challenge presented here is restricted to the assumption that there is no deflection, leaving real world considerations to future work.

While the tying is being performed the rebar must be held in place. Although it is possible to imagine some temporary means of holding the rebar in place while tying, we believe that at least one of the robots not involved in the tying can hold the rebar. When it comes to plan the actual robot motion for tying, there are many alternatives for this kind of path planning, e.g., RRT-like methods. If possible, the robots not involved in the tying will be standing still, making the problem into a 9 DOFs planning problem.

D. Transition to real world

In the previous sections, we considered the problem from a purely theoretical point of view, neglecting real world effects such as deflections and misalignments. These effects can be treated in at least two different ways: (i) calibrate the system to get the real world system behavior closer to the idealized situation, or (ii) adapt the algorithms to the real world behavior. Most likely a combination of the two will give best performance.

We tested the transition from the simulation to the actual gantry-robot system setup in a lab, with hard-coded robot paths. In this setup, we did use both calibration and adaption. The effects which we calibrated for were deflection in the gantry construction and misalignments in the mounting of the robots and in the gantry.

To calibrate for misalignments, we measured the position of a prism fastened to the robot TCP using an external measurement tool in a few different configurations and calculated the actual robot base position and orientation. We then adjusted the orientation and position of the robot base in the controller accordingly.

To calibrate for deflection in the gantry, we let the robots assume a position where its center of gravity is fairly well aligned with the base. We then made position measurements using an external measurement tool. This gives an offset between the actual position and the theoretical one. Therefore, we moved the robot position using the gantry producing a grid of such measurements giving a map of offsets. This map was used to produce an offset for each point in the robot program. This is not entirely unproblematic since if the robot is close to its limits such a displacement might make the point out of reach. Moving a point can also change which robot configurations can reach the point. These two effects will have to be taken into account when generating robot movements, meaning that we are adapting our algorithms to reality.

Another effect on the gantry comes from the torsion on the gantry when the robot is working in a position where it stretches to the side. This torsion means that the robot TCP will depend on where the robot is working and what weight it is currently lifting. We have measured this in the lab and found the effect to be small enough to neglect. This might not be the case when producing real size rebar cages however.

An effect that cannot be calibrated away is the deflection of rebars. This effect enters both in placement and tying of rebars. When placing rebars, collisions that would not have occurred for completely stiff rebars might occur when the rebars deflect. This might also happen if an angle of a rebar is not precisely as intended.

When tying rebars together deflection often means that the point in the rebar which is supposed to be tied to the cage is not at the location where it should be. The most obvious example being that the point is below where it should. However, this is not the only direction a point may be displaced. This can happen when a rebar is lifted with one tool completely fixing the rebar while another is letting the rebar rotate and slide along the rebars longitudinal direction. The deflection of the

rebar can then mean that the longitudinal position of the point is shifted as well. The only location on such a rebar which is reliable is the gripping point of the fixating tool. To address this problem, it might be possible to start tying close enough to the fixating tool that the precision becomes good enough. Alternatively, it might be possible to displace the rebar position such that the tying location on the rebar is in the correct position. This would require accurate simulation of rebar deflection. Finally, it is possible to use some kind of temporary support structure.

So far, we have mainly discussed physical effects as well as ways of integrating them into the motion planning. We have most likely missed some effects and also the solutions we have proposed have finite accuracy. This leads to the topic of tolerances. When testing a system like this in the real world there will have to be tolerances which allow for the modifications that we propose as well as for the lingering errors. This, together with the modifications themselves, means that a rebar cage that is possible to build in theory might not be possible to build in practice.

IV. SUMMARY AND WORK-IN-PROGRESS

In this paper, we presented our ongoing work towards robotic construction of rebar cages. As a first step towards a solution, we are considering rebar placement in an ideal, simulated, world with no deflection. We will then move on to develop techniques for computing rebar installation ordering and paths for tying of rebars to the cage. Once completed, we are ready to start simulating deflection and to reiterate the steps above with this new source of difficulty. Finally, we will perform real world tests, first using small rebar cages in a lab setting (see Fig. 1) and then full scale tests.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to acknowledge the team at Robotdalen, both current and previous members, especially Ingemar, Hugo and Josef.

REFERENCES

- [1] B. Dolinšek and J. Duhovnik, "Robotic assembly of rebar cages for beams and columns," *Automation in Construction*, vol. 8, no. 2, pp. 195–207, 1998.
- [2] A. Mirjan *et al.*, *Building a Bridge with Flying Robots*. Springer, 2016.
- [3] H. Ardiny *et al.*, "Are autonomous mobile robots able to take over construction? a review," *Int. J. Robotics*, vol. 4, no. 3, pp. 10–21, 2015.
- [4] R. Bogue, "What are the prospects for robots in the construction industry?" *Industrial Robot*, vol. 45, no. 1, pp. 1–6, 2018.
- [5] B. Miloradović *et al.*, "Extended colored traveling salesperson for modeling multi-agent mission planning problems," in *ICORES*, 2019, pp. 237–244.
- [6] R. Poli and W. B. Langdon, "Backward-chaining evolutionary algorithms," *Artificial Intelligence*, vol. 170, no. 11, pp. 953–982, 2006.
- [7] S. Ge and Y. Cui, "Dynamic motion planning for mobile robots using potential field method," *Auton. Rob.*, vol. 13, no. 3, pp. 207–222, 2002.
- [8] A. Reiter *et al.*, "On higher order inverse kinematics methods in time-optimal trajectory planning for kinematically redundant manipulators," *IEEE Trans. Ind. Inf.*, vol. 14, no. 4, pp. 1681–1690, 2018.
- [9] S. M. LaValle, "Rapidly-exploring random trees: A new tool for path planning," Tech. Rep., 1998.
- [10] S. M. LaValle and J. J. Kuffner Jr., "Randomized kinodynamic planning," *Int. J. of Rob. Res.*, vol. 20, no. 5, pp. 378–400, 2001.
- [11] S. Karaman and E. Frazzoli, "Sampling-based algorithms for optimal motion planning," *Int. J. of Rob. Res.*, vol. 30, no. 7, pp. 846–894, 2011.

Installation Order in Automatic Fabrication of Reinforcement Rebar Cages

Johan Relefors¹, Mahdi Momeni², Lars Pettersson³, Alessandro V. Papadopoulos², and Thomas Nolte²

¹Solving Robotics Sweden AB, Västerås, Sweden

²Mälardalen University, Västerås, Sweden

³Skanska Sweden AB, Stockholm, Sweden

Abstract—Despite the significant development of automation in the manufacturing industry, the construction industry has not yet comparably gained much from automated processes. Fabrication of reinforcement rebar cages is one good example where automation has a limited application. Several challenges have to be tackled to introduce and take advantage of the automatic fabrication of reinforcement rebar cages. One important challenge is how and in what order the rebars should be installed one after another so that the fabrication of a reinforcement rebar cage is feasible. In this paper, we present our ongoing work towards proposing a method that gives a solution to finding the installation order of rebars.

I. INTRODUCTION

The manufacturing industry has gained a lot of benefits through employment and the application of automation and robots in their production lines. The majority of the robots are used in the automotive, electronics, and metal machinery industries¹. While the interest in employment and application of robots in the manufacturing industry is increasing on a daily basis, the construction industry has not yet witnessed major applications of robots to automate construction. Even though there are initiatives towards automation in construction domain both in research [1]–[5], and in industry, e.g., Built robotics², MX3D³, IronBot or TyBot⁴, the overall trend has not yet been properly reflected in the construction industry. One reason for the lack of reflection could be the difference(s) between the construction industry and the manufacturing industry which makes the employment of robots in the construction industry, which are perhaps expected to be on-site, a challenging task. One key difference between the construction industry and manufacturing industry is that construction projects are known to be one of a kind. As a matter of fact, automated solutions require special and careful considerations. A particular example, which is also of interest in this research, would be the fabrication of reinforcement rebar cages which is done manually even to this date. In addition to the required time, such manual work is often strenuous which can also happen under hazardous and harsh conditions, which in return is

also reflected in a high risk for work accidents. The above-mentioned, as well as other issues, create a huge potential need for utilizing automation techniques in the construction industry, with a promise for increased safety and efficiency, as well as reduced costs.

In this work, we address the automated fabrication of reinforcement rebar cages. In particular, we consider proposing a solution for the problem of finding an installation order by which the rebars can be placed one after another so that the rebar cage is eventually fabricated.

II. PROBLEM STATEMENT AND MISSION

The overall idea of the robotic fabrication of reinforcement rebar cages, including simulation, a proof-of-concept installation, and a description of some of the challenges ahead, was introduced in [1]. The idea is to automate the pre-fabrication of rebar cages. Upon completion, each rebar cage is transported to its final position before pouring concrete. Importantly in the context of this work, rebar cages are often one of a kind

Part of automating the generation of programs for the fabrication of rebar cages is to automate the process of *finding* an installation order for the rebars in a given rebar cage. There is also another important related part which is to answer the question of whether there *exists* a valid installation order for a given rebar cage. A fast method for either finding or showing the existence of an installation order would be most helpful when designing rebar cages. In this paper, we focus on our ongoing work on the question of *finding* an installation order. Or stated differently, the problem we wish to solve is:

Problem. *Given a 3D model of a reinforcement rebar cage, find an order in which the rebars should be installed in order to produce the rebar cage using the setup described in [1].*

When examining this problem we are working under the following assumptions:

Assumption 1. *The rebars are rigid enough, i.e., they do not deflect or twist because of their weight.*

Assumption 2. *The rebars are not deformed during the process before/after the cut and bend machine, i.e., their theoretical geometry is the same as their actual geometry.*

Assumption 3. *While lifting rebars out of the cage, two movements are allowed for the rebar: a straight line on*

This work was supported by the Knowledge Foundation with the Automation Region Research Academy (ARRAY) and SBUF.

¹<https://ifr.org/>

²<https://www.builtrobotics.com/>

³<https://mx3d.com/>

⁴<https://www.constructionrobots.com/>



Fig. 1. Gantry robot systems

a horizontal plane or along the vertical axis. Horizontal movements could be parallel to either the x - or y -axis of the reference frame while the vertical movement is parallel to the z -axis of the reference frame.

The aim of this paper is then to outline our ongoing efforts and intention to tackle the problem of how to automatically generate an ordering of rebars which enables the robots to fabricate a cage by mounting and tying the rebars of different types, such as “A”, “B”, and “C”-bars, one after another. The installation order must allow for collision-free paths and the cage needs to be stable throughout the entire installation process, as well as when moving the rebar cage to its final location.

The problem of finding a valid installation order is a task planning problem. The input to the problem is then an unordered set of rebars $R_{in} = \{A, B, C, \dots\}$ where each rebar has geometric information of shape, position, and orientation associated with it. The desired output is an ordered set R_{out} giving the installation order of all the rebars in R_{in} together with additional generated information on where to grip the rebars and where to tie the rebars into the already installed rebars. Note that we are not currently looking for an ordering which is optimal under some criteria, but rather an ordering which is feasible.

Another way of looking at the problem is to assign each rebar to a node in a graph. And letting the directed edges in the graph correspond to an ordering relation. Any edge in the graph might then be allowed or not allowed. This view highlights an interesting feature of the problem which is that the same edge can be allowed or not allowed depending on which of the nodes have already been visited. As an example, a rebar A might be blocking rebar B but rebar C might not block either of them. In this case, the ordering CAB is not allowed while the ordering BCA is allowed. Note that both orderings contain the sub-ordering CA which would correspond to an edge in the graph. This edge is allowed if B has already been placed but otherwise it is not allowed. This means that it is not possible to simply map the edges of the graph and then find a way through the graph.

From the discussion in the previous paragraph, we conclude

that in order to solve the ordering problem we need the ability to determine whether a given state of the cage allows for a particular rebar to be installed. Given that rebars $\{A, B, C, \dots\}$ have been placed, rebars $\{a, b, c, \dots\}$ have yet to be placed, and we want to determine whether rebar a can be placed we need to determine the function

$$f(A, B, C, \dots, a, b, c, \dots, a) = \begin{cases} \text{true} & \text{if } a \text{ can be placed,} \\ \text{false} & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (1)$$

One method for determining the output of f for installing a rebar in a given situation is to try to compute a path for the rebar, and then check that the rebar is not blocking the installation of any other rebars which are yet to be installed. However, producing a path is time-consuming and, in a case where there are many rebars to install, the combinatorics of the problem will lead to many evaluations of f .

The naive method described above will most likely not be fast enough for use in the process of designing rebar cages. Reducing the time that it takes to compute f , or reducing the number of times that f needs to be computed, are two ways of speeding up the computation of a valid installation order. In this paper, we propose two methods that we are working on evaluating.

III. METHODOLOGY

In the ideal case, f only needs to be evaluated as many times as there are rebars in the cage, completely removing the combinatorial aspect of the problem. To find such an algorithm, we would need to formulate precedence constraints on which rebars could potentially be installed in a partially assembled cage. Note that for a given partially assembled cage, there could be many rebars that are possible to install, introducing some arbitrariness in the installation order.

If an algorithm that never needs to evaluate f to *false* is not found, the number of evaluations of f should be minimized. In this section, we briefly investigate how to compute an installation order by starting with no rebars installed, and moving forward until completion, as well as starting from a fully built cage, and disassembling it until no rebar is present, and using the reversed disassembly order. Furthermore, since it is most likely that f will sometimes evaluate to *false*, we should aim for computing f in a way that terminates early in the process when a rebar cannot be installed. Therefore, before turning to the ideas for rebar installation order, we first briefly look at computing f and how these ideas can help in reducing the combinatorial nature of the problem.

A. Computing f

At least for now, the only way that we can guarantee that a rebar can be installed is to compute paths for placing and tying the rebar in the cage. However, many ways of determining when a rebar cannot be installed exist.

When computing the installation path we start with the rebar in its position in the cage and try to remove it with the constraint that the rebar should be possible to remove using a

simple set of movements, see Assumption 3. This means that one way of figuring out whether a rebar can be installed or not is to check whether the simple movements are enough for removing the rebar from the cage. Below we list a few ways that installation of a rebar can fail:

- The rebar cannot be removed using simple movements of Assumption 3.
- The rebar is blocking the path of the remaining yet-to-be-installed rebars in an unavoidable obstacle.
- There are not enough valid grip locations on the rebar (considering only the tools and not the gantry robot systems).
- There are too few available tie points for the cage to remain stable after placing and tying the rebar (again considering only tools and not the gantry robot systems).
- The grip positions cannot be reached by the gantry robot systems.
- The tie positions cannot be reached by the gantry robot systems.

These ways of failing are computationally less expensive to check than the computation of a path (they are actually necessary when computing a path). This means that negative evaluations of f can terminate faster than positive ones.

Another way to speed up the computation of f is to save and keep track of the evaluations of f as well as the reasons for failures as a reference in future evaluations. For example, if a certain rebar cannot be installed in the cage because it needs additional support, we note which rebars could provide support for the rebar and don't consider the rebar for installation again until enough support is added.

B. Pre-computing parts of f

Valid installation orders can be found by removing the invalid ones. The preceding discussion on computing f hints at ways of removing some invalid orders by creating precedence constraints from the different ways f evaluates to *false*.

Precedence constraints can for example be based on which rebars are tied together. Starting from the rebars in the bottom of the cage, only rebars that tie into these can be considered possible to install. Then, one can consider the cage after those rebars have been added, and see which rebars can be installed then. Another way of incorporating constraints from tying is to loop through all rebars in the cage and establish for each rebar, which other rebars are necessary for stability. Similar things can be done by checking which other rebars are in the way of a specific rebar when trying to remove that rebar.

Precedence constraints created in this way amount to a partial pre-computation of f . The pre-computation is used for reducing the combinatorial complexity of the problem. This can be useful as long as the pre-computation itself does not give a large combinatorial factor and the evaluation of the part f that is considered is fast enough.

C. Proposed Solutions

Ignoring precedence constraints for the moment and looking at ways to create an installation order, we find two ways of

thinking. One is starting with no cage and adding rebars, one by one. The other is starting from the final state of the cage and removing rebars one by one and finally reversing the uninstallation order to get an installation order. We call these methods the forward and backward methods, respectively.

1) *Forward*: In the forward method the general idea is to look at the cage and identify which rebars tie into the cage in a stable way given the cage's current state. Among the rebars we then start by trying to install the rebar with the tie points with the lowest "Z-"coordinate. In cases where this does not fully determine the order, we start with the rebar which is closest to the origin which we take to be in one of the corners of the cage⁵. This has to be done in a way that makes sure that the rebar does not block the installation of any other yet-to-be-installed rebars.

2) *Backward*: In the backward method, we start from the final state of the cage and identify rebars that can be removed to find an uninstallation order. Choosing which rebar to try to uninstall is not as clear as choosing which rebar to try to install in the forward method. It has to be a rebar that can be removed without compromising the stability of the rest of the cage. Possibly choosing one with the fewest tie points into the cage or some similar metric. While the uninstallation of a rebar is done, it should not affect the uninstallation of subsequent rebars. However, uninstalling a rebar might remove support for other rebars which could render the cage in a state where no rebar can be removed without affecting the stability of the cage.

3) *Precedence constraints*: Turning to the precedence constraints, the idea is to try to capture the positive sides of both types of algorithms. The natural order of installation and certainty of support imposed by the forward method can be captured as precedence constraints. These can hopefully be merged with the certainty that installing a rebar does not block the installation of another rebar. Looking at evaluations of f , the forward and backward method capture different aspects of the evaluation.

IV. DISCUSSION

To generate the installation order, two methods have been proposed in this paper. In the *Backward* method, the installation order is found by reversing the deconstruction process while in the *Forward* method, the rebar cage is fabricated straight away. The *Forward* method is inspired by how skilled workers fabricate a cage.

In the *Forward* method, the general idea is to start with no rebars installed and finding an installation order by placing and tying rebars in a stable way. In the *Backward* method, the idea is to start with the fully built cage and remove rebars one by one from the cage without causing any instability, and then reversing the order to get an installation order.

In the *Forward* method, the only rebars which can be installed are the ones that tie into the already installed rebars.

⁵Moving the origin would produce different installation orders, which is something we intend to try.

This limits the search space at any given state of the cage. On the other hand, in the *Backward* method, we have not found a simple way of limiting which rebars that are possible to remove. This means that the *Forward* method has fewer branching possibilities, thereby reducing the combinatorial difficulty of the problem.

In the *Forward* method, installing a rebar could give a situation where one of the yet-to-be-installed rebars cannot be installed. To avoid blocking yet-to-be-installed rebars, checks involving both the state of the cage and the yet-to-be-installed rebars need to be performed. In the *Backward* method, removing a rebar is most likely not going to hinder the removal of other rebars in the cage. That means that the state of the cage can be treated separately from the uninstalled rebars.

V. SUMMARY AND WORK-IN-PROGRESS

In this paper, we presented our ongoing work towards automatic generation of the installation order for robotic fabrication of rebar cages given a 3D CAD model of the rebar cage. We defined a function, f which evaluates to *true* or *false* depending on whether a given rebar can be installed at a given position in a yet unfinished rebar cage. We then defined and analyzed our problem using properties of f .

Using a few different ways in which f evaluates to *false* we can derive precedence constraints among the rebars of a given cage. The justification for focusing on the *false* evaluations is that the needed computations are often much faster since *true* evaluations require an actual path to be generated. This partial evaluation of f reduces the combinatorial difficulty of the problem.

We also briefly examined a forward and backward method for computing an installation order and subsequently analyzed the properties of the methods in terms of precedence constraints. In our ongoing work, we are working on developing an algorithm that captures the positive sides of both the forward and backward methods, by removing invalid orderings. Part of our future work will include showing that our proposed method(s) will find a solution for the installation order given that such solution exists. We are also aiming to find an optimal solution for the automatic generation of the installation order, to minimize the required time as well as gantry-robot motion to fabricate a cage.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to acknowledge the team at Robotdalen, both current and previous members, especially Ingemar, Anders, and Erik.

REFERENCES

- [1] J. Relefors, M. Momeni, L. Petterson, E. Hellström, A. Thunell, A. V. Papadopoulos, and T. Nolte, "Towards automated installation of reinforcement using industrial robots," in *24th IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 2019, pp. 1595–1598.
- [2] B. Dolinšek and J. Duhovnik, "Robotic assembly of rebar cages for beams and columns," *Automation in Construction*, vol. 8, no. 2, pp. 195–207, 1998.
- [3] A. Mirjan, F. Augugliaro, R. D'Andrea, F. Gramazio, and M. Kohler, *Building a Bridge with Flying Robots*. Springer, 2016.
- [4] H. Ardiny, S. J. Witwicki, and F. Mondada, "Are autonomous mobile robots able to take over construction? A Review," *Int. J. Robotics*, vol. 4, no. 3, pp. 10–21, 2015.
- [5] R. Bogue, "What are the prospects for robots in the construction industry?" *Industrial Robot*, vol. 45, no. 1, pp. 1–6, 2018.

Slutrapport SBUF 13556

Referens nr 3



Review

Automated fabrication of reinforcement cages using a robotized production cell[☆]

Mahdi Momeni^{a,*}, Johan Relefors^{a,b}, Abubakar Khatri^c, Lars Pettersson^c,
Alessandro V. Papadopoulos^a, Thomas Nolte^a

^a Mälardalen University, Västerås, Sweden

^b Robotdalen AB, Västerås, Sweden

^c Skanska Sweden AB, Stockholm, Sweden

ARTICLE INFO

Keywords:

Automatic construction
Digital fabrication
Construction robot
Path planning
Reinforcement cages

ABSTRACT

Unlike what is common in the traditional manufacturing industry, the structures in the construction industry are often one of a kind. The goal of this work is to provide a real-world compatible fully automated gantry-robot system for flexible serial production of custom-made reinforcement cages. This can lead to increased efficiency, productivity, and sustainability, not to mention the positive impact on labour safety as well as decreased environmental impact. In this paper, we present a solution utilizing three industrial robots mounted on a gantry structure for automatic generation of robot paths for moving, placing, and tying rebars. Moreover, we present how a 3D BIM-model of a rebar cage, along with installation instructions such as the order in which the bars should be installed, are transferred into CoppeliaSim. This proof-of-concept implementation is an important milestone indicating the feasibility of our proposed robotic solution for the automated fabrication of one-of-a-kind reinforcement cages.

1. Introduction

In the context of the construction industry, installation of reinforcement bars (rebars) for concrete structures is a time-consuming manual process, performed one rebar at a time, see Fig. 1. Traditionally, reinforcement is installed directly in the formwork, bar by bar. Prefabricated reinforcement cages are also sometimes used. In such cases, the cages are often prefabricated off-site and transported to the site where they are installed in their permanent position. Either way, the installation of the bars is done manually.

This manual work poses several challenges to the workers that perform the work as well as to the projects that include this type of work. Two important challenges that can be mentioned are that reinforcement installation is very heavy and it is also time-consuming. This type of work affects the worker's health and it also negatively affects project schedules. On top of this, the installation of reinforcement is normally found on the critical path of virtually all large civil construction projects, meaning that the project schedule is directly affected by the installation

time. One way of dealing with the time-critical aspect of reinforcement installation is to manually prefabricate the reinforcement in bigger units, often referred to as reinforcement cages or *rebar cages*. These units can be fabricated off-site and then, once fabricated, lifted into their permanent positions before pouring the concrete. This way of installing shortens the overall construction time, but will not change the fact that the reinforcement is still manually fabricated.

The solution proposed in this paper has the benefit of minimizing the produced waste, as, in the proposed set-up, the reinforcement bars are bent and cut using bar coils. As a result, only the necessary reinforcement for the particular cage under construction is used, in contrast to the manual installation process, where bars not used for structural purposes are normally cut from standard length bars, leading to unnecessary waste on the site. Moreover, as the installation will be based on a 3D BIM-model, only the necessary bars included in the design will be installed, avoiding further waste.

The two most relevant advantages are the time saved on the critical path of the project, thanks to overall increased efficiency and

[☆] This work was supported by the Knowledge Foundation with the Automation Region Research Academy (ARRAY) and SBUF.

* Corresponding author.

E-mail addresses: mahdi.momeni@mdh.se (M. Momeni), johan.relefors@robotdalen.se (J. Relefors), abubakar.khatri@skanska.se (A. Khatri), lars.g.pettersson@skanska.se (L. Pettersson), alessandro.papadopoulos@mdh.se (A.V. Papadopoulos), thomas.nolte@mdh.se (T. Nolte).

<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103990>

Received 30 December 2020; Received in revised form 29 September 2021; Accepted 1 October 2021

0926-5805/© 2021 The Authors. Published by Elsevier B.V. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Fig. 1. Manual reinforcement installation in progress.

productivity, and the reduction of hard work and wear of the workers required to install the reinforcement manually. In addition to that, removing the difficulties of manual fabrication is one of the benefits of such a process. Another benefit would be potential cost savings due to a faster fabrication process. However structures, like houses, bridges, or tunnels are unique and one of a kind, i.e., they are built for a special purpose, taking into account the site conditions when designing them. Even though repetitive operations are strived for, automating the reinforcement process for built-specific structures poses a different challenge from automating serial production. Most strikingly, each unique reinforcement cage requires its own set of operations to be performed. This means that the automation must be flexible enough to handle a large set of operations, enabling the fabrication of a large set of rebar cages.

In order to determine which operations are to be performed, all the information regarding how the rebar cage should be fabricated must be fed to the automation system, preferably as a digital model. One example of such a digital model is a 3D BIM-model including detailed information for all rebars, see an example in Fig. 2.

In this paper, we investigate the automation of the fabrication of rebar cages. To do this we present a production cell with a gantry structure and three industrial articulated robots. We also present algorithms for generating paths for the production cell which execute the required operations.

To demonstrate the capabilities of the presented solutions, we utilize a virtual production cell implemented in CoppeliaSim [1], with a use case for the assembly of a rebar cage provided by the construction company Skanska.¹ The demonstration covers key steps necessary, from drawings of the rebar cage to tying of individual rebars positioned in place by the industrial robots of the production cell. Moreover, we also outline some of the challenges that should be tackled for bringing the idea of robotic fabrication to the real world. A simple sketch of the process for automatic fabrication of reinforcement cages is depicted in Fig. 3. However, note that this sketch only intends to show the steps needed for automated pre-fabrication of the rebar cages, given the 3D BIM-model as an input and the corresponding pre-fabricated rebar cage as an output. This should be compared with other methods of pre-fabrication. The pre-fabricated cage will, just as any pre-fabricated cage, have to be transported to the site and installed in its permanent location. The transportation, as well as other changes in the construction process, which are needed to introduce such a robotic system, are well beyond the scope of this paper. While we mention aspects of digitalization and automation, our objective is focused on executing operations

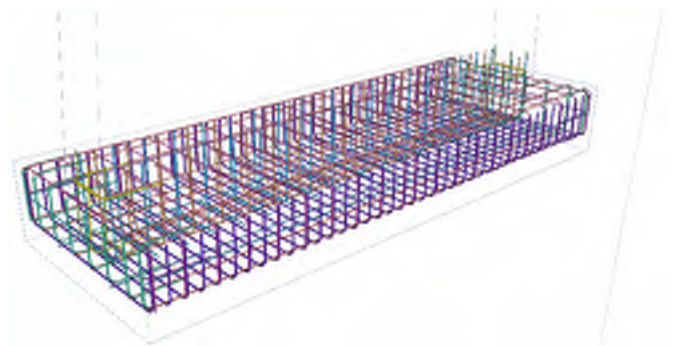


Fig. 2. 3D BIM-model of a rebar cage.

that, when executed in sequence, enable the fabrication of a specific rebar cage. It should also be noted that in the suggested solution, the robots are not supposed to move around the construction site but rather, their movements are limited to the place where the rebar cages are to be pre-fabricated.

The outline of the paper is as follows. Section 2 presents related work. Section 3 describes the production cell used for the automated fabrication of rebar cages. Section 4 presents an overview of the suggested approach for automatic fabrication of rebar cages. Section 5 outlines the path planning methods used for picking, placing, and tying rebars, followed by a proof-of-concept implementation in Section 6 and demonstration in Section 7. In Section 8, we discuss the idea in more detail. Finally, Section 9 concludes the paper and presents the discussion along with the future direction of this research.

2. Related work

In comparison to advances in methods and technology used in the manufacturing industry, the methods and tools used in the construction industry have not developed significantly. Traditional methods used in today's construction industry don't necessarily address the demands for efficiency, productivity, and sustainability. Robotics is a key and enabling technology for innovation in the construction industry. Despite all the benefits offered by robotics, possible future scenarios of the application of robotics in the construction industry have not been systematically and extensively explored. Thus, how the construction industry will develop in the future and what kind of robots should be

¹ <https://www.skanska.se/en-us/>

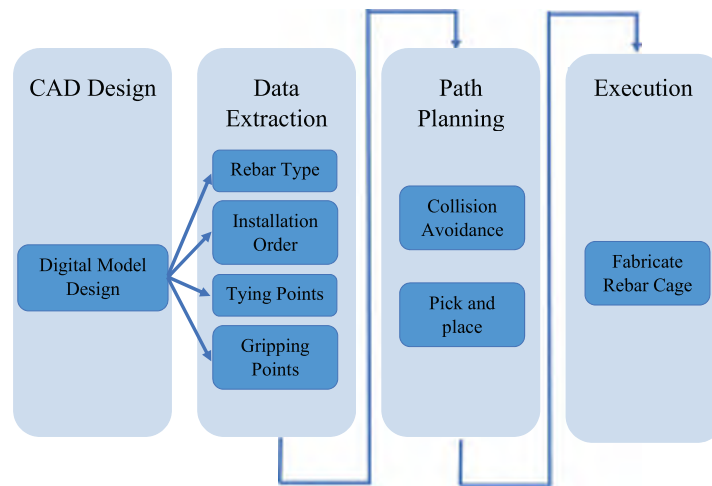


Fig. 3. Overall process scheme.

developed is not yet clear. Furthermore, because construction robotics is not yet an established field, design experiences or robust data from previous developments and applications are lacking [2].

In [3], one of the first research ideas on robotic construction is presented. In the paper, the possibility of using industrial robots and possible applications in the construction industry was investigated. In [4], the author presents the idea of using a gantry-robot system as well as the design of a modular robot system for building applications. In [5], the authors propose a robotic cell to assemble rebar cages for beams and columns. Their proposed robotic cell includes four industrial robots hanging on a gantry system. The inputs to this system are the pre-manufactured rebars, and the output consists of rebar cages, similar to what we present in this work. However, their paper only presents the proposed robotic cell without really building and testing it. In our case, we built the gantry-robot system, simulated and experimentally demonstrated the fabrication. We have also observed challenges when working to bring this idea to life, these will be discussed in the following sections. Additionally, we have also previously presented our proof-of-concept downscaled preliminary production cell for automated construction of rebar cages² and in [6] we have highlighted key challenges when it comes to automating the overall process of using the production cell to fabricate rebar cages.

In recent years, the scientific community has witnessed an increasing interest in 3D printed concrete [7] and robotic fabrication with concrete [8]. However, automated integration of structural reinforcement is still a challenging problem [9]. Hack et al. [10] present a robotic fabrication process that unifies concrete form-work and structural reinforcement. Kontovourkis and Tryfonos [11] developed a parametric-integrated algorithm for tool-path planning and 3D printing control using an industrial robot.

To the best of our knowledge, there does not exist any robotics system for the automatic fabrication of reinforcement rebar cages. However, there are two robots called TyBot as well as IronBot.³ Yet, these robots are of a different nature and with different tasks. TyBot is a mobile tying machine/robot which ties the already placed rebars together, while the IronBot is a mobile pick and place single robot. These robots are meant to build cages in, e.g., bridge construction. None of these robots is able to cooperatively and automatically place the rebars one after another and tie them together to build cages. However, in our

case, the robots are interacting with each other to cooperatively mount different bar types one after another to fabricate a rebar cage corresponding to a given 3D BIM-model as input.

From a robotics perspective, the problem that we face is to plan for single-piece manufacturing using three kinematically redundant gantry-robot structures. More specifically, the problem is divided into (i) planning in joint space for tying rebars together, and (ii) planning for bi-manual manipulation in Euclidean space for placing rebars in the rebar cage, which is a planning problem for a closed kinematic chain.

In [12] a similar problem to our placement planning problem is described. The authors describe the manipulation of parts made of carbon fibre reinforced plastics, to be used as aeroplane components. They use two 6 Degrees Of Freedom (DOF) robots, each on a linear axis, to manipulate a large number of different parts. Their path planning technique uses one robot as a master, for which a path is computed first, and the other robot as a slave which adapts to the path of the master. Their objective is to minimize programming time due to a large number of parts. In this work, however, we focus on the minimization of programming time for single-piece production.

Another work where bi-manual manipulation and a single axis are used in [13]. Their application is moving aluminium parts for an avionics application. It is worth noticing that they define the gripper positions manually. Similarly, we also define the gripping points as well as the tying points manually during the data extraction from the digital model. However, part of our future work will be to further investigate how to automatically generate the gripping and tying points.

We have not used the methods cited above for our bi-manual manipulation path planning. The main reason is that we were not aware of these methods when the work started. As a general comment on planning for a single robot at a time, this is generally not a good idea when the robots are likely to interfere with one another which is often the case in our path planning problem.

It is worth noticing that our planning problem must be solved under large uncertainties due to imperfections coming from the rebar manufacturing process, as well as deflections of rebars and parts of the gantry-robot system. Dealing with such non-idealities is an important problem, but it is beyond the scope of this paper, and it is left to future work. In this paper, we assume that everything is ideal, as explained in Section 4.

3. The production cell

We consider a production cell consisting of a gantry structure, with

² https://www.youtube.com/watch?v=o9TOAa5g_Zo

³ <https://www.constructionrobots.com/>



Fig. 4. The down-scaled system with 2 DOF per gantry.

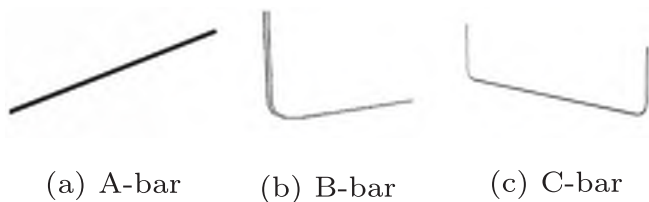


Fig. 5. Some of the rebar types that we consider in this work.

three robotic arms. A previous version of the production cell is shown in Fig. 4. The three robotic arms are attached to the gantry structure from their base, and hanging downwards, i.e., they are positioned upside down. Labelling the vertical axis as the z -axis the gantries can move the base of each robot in the x and y directions. The setup uses three ABB IRB1200-7/0.7 industrial robots, although any 6 DOF robotic arm with similar kinematics will work. Combining the DOF of a single gantry-robot system gives a total of 8 DOF. The full system, consisting of three gantry-robot systems, has 24 DOF which, disregarding collisions, can be controlled independently.

In our future production cell, and in the cell which we have used in simulation as well as the accompanying video for this paper, the gantry will be able to move the base of the robot also in z direction, giving 3 additional DOF to the gantry. The total number of DOF for the full gantry-robot system will then increase to 27. The methods proposed in this paper are developed for such a system. In the following, we refer to the full machine as the *full system*, or *system*, while each of the gantry-robot systems is referred to as a gantry-robot system. Note that the system intended for use in large civil construction projects, the full-scale system, will be much larger than the systems discussed above.

The production cell needs a delivery system for rebars. The full-scale system consists of a cut and bend machine and a fixture. The cut and bend machine takes rebar coils and produces different rebar types as in Fig. 5, according to a given order. The produced rebar is then placed in a fixture where the robots can pick them up. We have yet to develop this part of the real physical production cell. Instead, since we do not suffer the logistical problems of a real-world production cell in our simulation,

we present the rebars as hanging in free space above a table. In the following, a rebar being in the fixture refers to the rebar being in the pick location.

4. Overall approach

In this section, we briefly discuss our overall approach to the problem of going from a 3D BIM-model of a rebar cage to a finished rebar cage in the real world. We then define the scope of this paper as part of this overall approach and give an overview of related challenges. Specifically, we focus on and highlight details of picking, placing, and tying of rebars, along with the digitization process needed to facilitate such an automated installation of rebar cages.

4.1. Working assumptions

The presented approach is based on the following working assumptions:

Assumption 1. The gantry is a rigid structure, i.e., it does not deflect or twist because of the weight of the robots and the lifted rebars.

Assumption 2. The robot links and joints are not affected by physical loads, i.e., the kinematics of the robots are always described by the same equations.

Assumption 3. The rebars are ideal, i.e., they are rigid bodies, there are no deviations, deformations, or deflections. In other words, the rebars are assumed to have their theoretical geometry.

Assumption 4. The tying tool produces tight enough knots to firmly tie the rebars together. In other words, after being tied together the rebars are fixed with respect to each other.

Assumptions 1–4 are used in the simulation. Future research will be dedicated to investigating how to relax some or all of these assumptions, to port the proposed solution to a real-world solution.

4.2. 3D BIM-model to real-world cage

Given any method of assembly, there are constraints on the rebar cages that can be assembled. This in turn means that the design of rebar

cages must be adapted to the method of assembly, whether automated or manual. Assuming that we have a rebar cage that is suitable for assembly in our production cell, the problem of going from a cage's digital model to the real-world assembled cage can be divided into the following steps:

1. Calculate an installation order based on which fabricating the cage is feasible
2. Calculate grip points and tie points for the robots.

```

1: procedure BUILD_CAGE(Robots, CAD_model)
2:   PlacePaths, TiePaths, InstallationOrder  $\leftarrow$  ComputePaths(Robots, CAD_model)
3:   Cage  $\leftarrow \emptyset$ 
4:   while InstallationOrder  $\neq \emptyset$  do
5:     rebar  $\leftarrow$  InstallationOrder.next()
6:     path  $\leftarrow$  PlacePaths.next()
7:     actuate_path(Robots, path)
8:     Cage.add(rebar)
9:     path  $\leftarrow$  TiePaths.next()
10:    actuate_path(Robots, path)
11:    goto Homing position
12:  end while
13: end procedure

```

Algorithm 1. Procedure for the construction of the structure from the 3D BIM-model.

3. Generate system trajectories, which are compatible with the production cell.
4. Upload the generated instructions to the production cell's controller and execute.

Our overall goal is to start with a valid (from an automation perspective) digital model of a rebar cage as input and end up with an assembled rebar cage. In this paper, however, we mainly focus on the third step. More specifically, we take as input a 3D BIM-model of a rebar cage along with a file (supplementary data) containing the following information.

- **Installation order.** The order in which the rebars should be installed in the cage.
- **Rebar type.** The type of each rebar in the rebar cage. Different types of rebars exist, e.g., "A-bar", "B-bar", and "C-bar", depicted in Fig. 5.
- **Rebar dimensions.** Geometrical properties of the rebars.
- **Rebar's placement location.** The target position for each rebar in the cage under construction.
- **Grip points.** The grip position for each of the gripping robots for each of the rebars.
- **Tie points** The positions where each rebar needs to be tied into the already built part of the cage.
- **Tie instructions.** Instructions for tying each rebar in the cage. Includes the order of the tie points, as well as information on when one or more of the placing robots must release the rebar for a tie point to be accessible.

The availability of this information is essential for the automation of the fabrication process. Future research will focus on the automated generation of most of the required supplementary data.

4.3. Automated fabrication of the rebar cage

We consider a production cell as described in Section 3. The objective is to start from a 3D representation of the rebar cage to be fabricated, and automatically generate a plan for the full system that, when executed in the production cell, fabricates the rebar cage. An overview of the proposed method for accomplishing this is presented in Algorithm.

A model of the production cell and the 3D BIM-model are the inputs to Algorithm 1. These inputs can be used for a digital twin, which will also allow us to keep track of the current status of the production cell and assembly during operation. Information such as robot grips, where to tie, installation order, and robot paths, is to be generated. At this point, we use supplementary data for grips, tie points, and installation order and generate only the robot paths.

Note that the required data to control the robot cell are related to:

1. The identification of tie points and potential gripping points, based on the type of rebars.
2. The computation of the installation order, which grip points to use, and ordering of tie points.

Such a problem is more complex, and the adoption of Artificial Intelligence (AI)-based solutions for automated planning could be beneficial to explore [14], [15], [16]. However, AI-based methods will be explored in the future as a viable solution to further speed up and possibly optimize the overall process.

The first step in the algorithm is to calculate the installation order and the gantry-robot paths for installing all the rebars. The computation of the gantry-robot paths is as described in Algorithm 2, while the installation order is taken from supplementary data. We then follow the installation order and actuate the gantry-robot systems to follow each of the paths for placing and tying the rebars. Once the rebar has been placed, the rebar is tied into the structure.

Finally, the gantry-robot systems are moved to their respective homing position, waiting for new rebar to be produced which is then placed and tied in the same way as the previous rebar.

4.4. Computation of the robot paths

```

1: function COMPUTEPATHS(Robots,CAD_model)
2:   PlacePaths  $\leftarrow \emptyset$  ▷ Initialize the paths for placing rebar
3:   TiePaths  $\leftarrow \emptyset$  ▷ Initialize the paths for tying rebars
4:   Installation_order  $\leftarrow$  compute_installation_order(Robots, CAD_model)
5:   Cage  $\leftarrow$  CAD_model ▷ Initialize the cage to have the full CAD_model
6:   while Cage  $\neq \emptyset$  do ▷ Until the cage is not de-constructed
7:     rebar  $\leftarrow$  Installation_order.last() ▷ Get the last rebar to be placed
8:     hold_pos  $\leftarrow$  find_hold(CAD_model,rebar) ▷ Get the hold positions of the rebar
9:     path  $\leftarrow$  compute_path(Robots,Cage,rebar,hold_pos)
10:    PlacePaths.insert_at_beginning(inverse(path)) ▷ Store the inverse of the path
11:    tie_pos  $\leftarrow$  find_ties(CAD_model,rebar)
12:    while tie_pos  $\neq \emptyset$  do ▷ Get the tie positions for the rebar
13:      path  $\leftarrow$  compute_tie_path(Robots,Cage,rebar,tie_pos)
14:      TiePaths.insert_at_beginning(path) ▷ Store the tie path
15:      Cage.remove(rebar) ▷ Remove the rebar to the digital twin of the cage
16:    end while
17:    goto Homing position
18:  end while
19: return PlacePaths, TiePaths, InstallationOrder
20: end function

```

Algorithm 2. Algorithm for computing the paths needed to build the structure from the 3D BIM-model.

Computing the paths while assembling a cage is time-consuming and impractical. In our approach, we work in a digital model of the production cell and we “de-construct” the cage. This means that we compute paths for untying and picking rebars from a cage and placing them in the fixture. To manufacture the cage in the real production cell, untying becomes tying and the paths, as well as their order, are reversed.

The rationale for working backwards is that once the rebar is far enough – but not too far – away from the cage, the number of valid robot configurations is much larger than when the rebar is at its final location. This indicates that if we start from valid configurations for placing and tying the rebars, the problem of finding a path to the fixture should be easier than if we started from valid configurations at the fixture and tried to find a path for placing and tying the rebar.

We use the provided installation order to determine which rebar to

install. The first step is to determine the rebar path, from its location in the rebar cage to its place in a fixture. The next step is to determine possible “place and tie” configurations. These are picked randomly by sampling from the allowed configurations. Starting from the place configuration, we try to generate paths for the system to follow the generated rebar movement. Once that is done, tie paths are generated by again setting the rebar in the cage and then planning tie paths, possibly letting go of the rebar in order to access all tie points. If either the generation of the place path or the tie paths fails, we go back and try to generate new place and tie configurations.

When paths have been generated for picking, placing, and tying a rebar, that rebar is removed from the cage. The next rebar in the installation order is then addressed, with a slight modification. We try to reuse any previously generated path. This is done by offsetting the paths for the active robots⁴ to match the new rebars position and checking that the resulting pick, place and tie operations can be performed with no collisions.

5. Path planning

In this section we first outline the path planning method that we use for picking, placing, and tying the rebars and then we give a more detailed description of the steps involved.

The path planning is conducted through the execution of the following steps, each of which will be described in more detail later:

1. Create the path that the rebar will travel.
2. Create robot configurations for placing the rebar in the rebar cage.
3. Create robot configurations for tying the tie points while one or more robots are still holding the rebar.
4. Create the robot paths for pick and place of rebar.

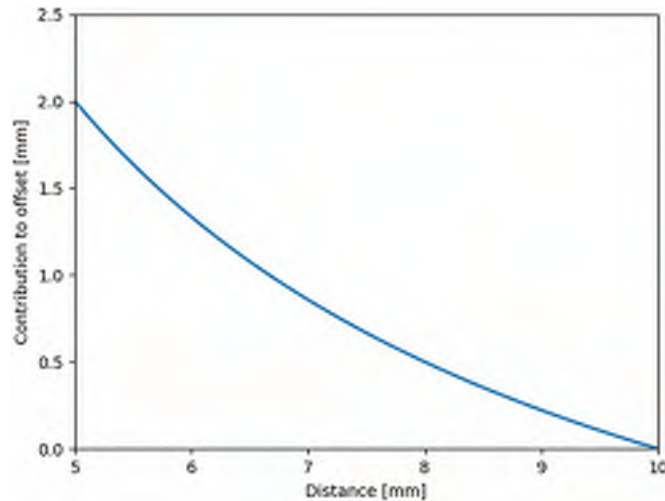


Fig. 6. The offset contribution from a single rebar to a moving rebar. The distance refers to the minimum distance between the rebars. Note that the rebars start at least 5 mm apart which is why the x-axis starts at 5 mm.

⁴ At times one or more robots are not involved and these must then simply be kept out of the way during the motions. We do this by defining safe locations for each of the robots, where the safe location for the middle robot depends on the current location of the two outer robots.

5. Create paths for the robot tying rebars together while potentially moving non-tying robots out of the way.

The first step, where the rebar path is computed, is considered independently from the robot movement. This means that we assume that we can compute robot movements to execute the pick and place based on the computed rebar path. While this makes path planning easier, it also limits which rebar cages can be built using our method.⁵ Finally, note that the order of the last two steps can be switched in the method that we use.

5.1. Creating the rebar path

The rebar path is computed starting from the rebar's placement position in the cage and ending with the rebar in the fixture. The reason for this reverse operation is that placing the rebar in the fixture is an easier problem than placing the rebar in the cage, mainly due to the crowded environment in the rebar cage.

To create a path that removes a rebar, called the moving rebar below, from the rebar cage, we use a number of deterministic steps. The pose of the moving rebar is stored after each step. This gives a path consisting of waypoints. The steps are:

1. Apply an analogue of a repulsive potential between the moving rebar from its neighbours in the cage.
2. Lift the rebar straight up to a height where it can move freely above the cage.
3. Translate the rebar to the middle of the cage
4. Translate and rotate the rebar such that it is positioned above the rebar fixture.
5. Lower the rebar into the fixture.

Applying a repulsive potential between the moving rebar and the other rebars in the cage means the moving rebar will be pushed away from its neighbours in a direction where no collisions occur. The idea is that this step should give an approach to the final location. This is essentially just potential field path planning, see for example [17], which introduces the possibility of getting trapped in a local minimum or oscillations. In this case, we assume that the rebar cage and the installation order are such that this does not happen.

Regarding the form of the potential, there are many possibilities and we have not searched for criteria to distinguish an optimal one. We have chosen a potential guided by the initial and desired distances between the moving rebar and the other rebars in the cage, as well as the number of iterations needed to remove the rebar. The chosen potential gives the offset magnitude

$$d(\Delta) = 0.002 \cdot \Delta \cdot \left(\frac{1}{\Delta} - \frac{1}{0.1} \right), \text{ when } \Delta \leq 10\text{mm}, \quad (1)$$

$$d(\Delta) = 0, \text{ when } \Delta > 10\text{mm}, \quad (2)$$

where Δ is the minimum distance between the two rebars. The potential is plotted in Fig. 6. The direction of the contribution is given by the direction of the vector from one rebar to the other.

The displacement contributions from all rebars with respect to the moving rebar are added to get a total displacement. We then impose a minimum and maximum allowed displacement for each iteration. If the magnitude of the displacement is larger (smaller) than the maximum (minimum) the magnitude is set to the maximum (minimum). The chosen maximum is 2.5 mm and the minimum is 1 mm. We stop iterating once the minimum distance from the moving rebar to all other rebars is 2 mm.

Following the repulsion step, we lift the rebar straight up, while checking for collisions, to a height where the rebar is free to move. The rebar is then moved above the fixture with the same orientation as it needs to have in the fixture. Finally, the rebar is lowered to its position in the fixture.

5.2. Creating place configurations

The way that we create configurations for placing the rebar is to sample the gantries in different positions and perform Inverse Kinematics (IK) for the remaining 6 DOF. We then check that the robot can release the rebar in its final location without hitting any kinematic limits or obstacles. Any robot that is not used is placed in a location where it will not interfere with the place movement.

If tying the rebars was not an issue it would most likely be good enough to perform this process until one collision-free place configuration is found. We do however want to keep the robots that are placing the rebar still when tying, at least for a few of the tie points. Therefore we have to adapt the place configuration to give enough room for tying. To do this we sample several place configurations and select the one with the largest difference along the first gantry axis, the sampling is described in more detail in Section 6. This does not always ensure that good tie configurations can be found but it is a useful heuristic. Other possible heuristics might guide the choice of place configuration. One possibility is to look at the joint angles for the last 6 DOF and see that the joint limits are as far away from their respective limits as possible.

5.3. Creating tie configurations

As mentioned in the previous subsection, we keep the robots that are placing the rebar still when tying at least a few of the tie points associated with a particular rebar. Some tie points might not be reachable in this way, and we assume that when this is the case it is indicated by the input data to the path planner.

As long as we keep the placing robots still we simply sample the tying robot at the tie location, as we sampled for the place configurations. We also make sure that the tying robot can perform a linear approach movement. This process typically has to be repeated a few times in order to find valid tie configurations.

When we need to move one of the placing robots out of the way, it is placed in a suitable location where it will not interfere with tying. The sampling of the tying robot then continues as before.

5.4. Pick-and-place path

What goes into this step is the rebar waypoints as well as the place configuration, which is the configuration of the system in the first waypoint. We then sample the full system at the next rebar waypoint, as before by sampling the gantry and using IK for the last 6 DOFs (the IK step is only to check for reachability as will be explained below). To get the path in between the waypoints we interpolate the rebar and the gantry-robot system together.

The rebar is interpolated using spherical linear interpolation (SLERP) [18] for orientation and linear interpolation for the position. For the robot interpolation, the gantry is interpolated linearly while the last 6 DOFs are determined using IK in order to follow the grips on the rebar and that the path must be continuous in the robot joints.

Once a path between the first and second rebar waypoint is determined the process continues between the second and third rebar waypoint, using the computed configuration at waypoint two as the starting point for the robots. The process typically does not work for every possible random sample at each rebar waypoint. For this reason, we try multiple times in order to find a path. When doing this we apply a depth-first search where each starting configuration at a given rebar waypoint is used for some maximum number of times and we stop searching once one path to the fixture is found.

⁵ Relaxing this assumption is part of our future work.

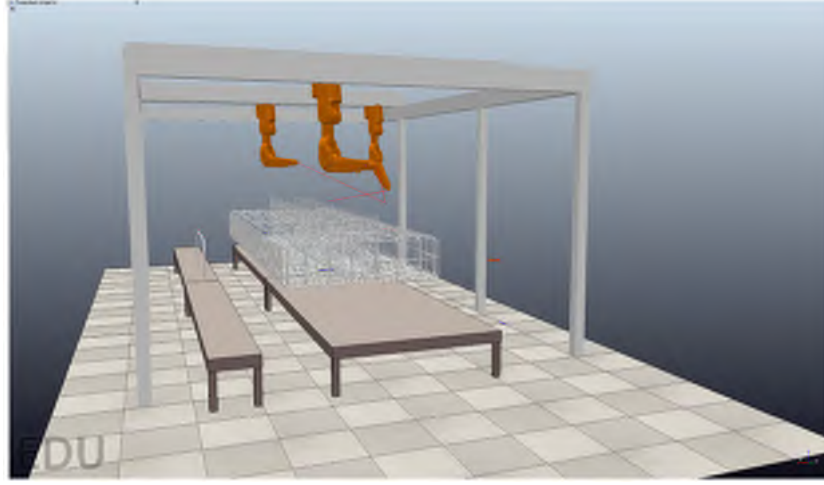


Fig. 7. Coppeliasim simulation scene used for virtual demonstration.

Note that the algorithm presented above is not probabilistically complete. Meaning that it will not always find a solution, even in cases where there is one. However, we have not found a complete algorithm for this planning scenario.

5.5. Creating tie paths

In short, the tie paths are computed using bi-directional RRT-Connect [19,17], referred to as BiRRT in the following. The tying robot starts in a configuration where it is out of the way for the placement of the rebar. We then plan to the first tie point, then the second, and so on. If any of the place robots need to be removed for tying to continue then the path for this movement is also planned using a BiRRT while keeping the other two robots standing still.

6. Implementation in Coppeliasim

In order to test the algorithms described in Section 4 and Section 5 we have implemented them as a plugin to Coppeliasim using its regular API.⁶ In Coppeliasim we have set up the gantry structures of the production cell of Section 3, as well as the robots. The gantry is modelled using cuboids for the links and we have then added joints to be able to move the industrial robots around using the gantry. The robots that we use have been implemented by importing ABB IRB1200-7/0.7 CAD data⁷ to Coppeliasim and adding the proper joints to the model. The setup is displayed in Fig. 7.

In the following, we describe implementation details concerning the central steps of (i) data import, (ii) sampling, (iii) interpolation, and (iv) path planning, respectively.

6.1. Data import

This subsection details the central steps involved when loading all relevant data of the rebar cage to be constructed by the production cell into the memory of Coppeliasim. In addition, as part of the data being automatically imported into Coppeliasim, in this paper the installation order (of rebars) is given in the data file. The installation order is the sequence order for which the assembly process of the cage's rebars is supposed to be executed, to eventually end up with the desired reinforcement cage. The installation order must be, and it is assumed to be, a feasible order with respect to assembly in the production cell.

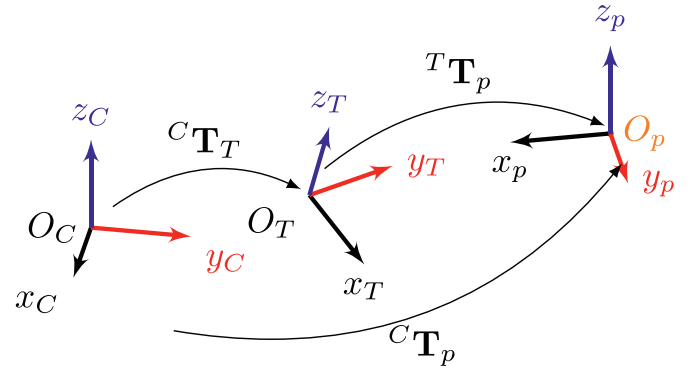


Fig. 8. To transfer frames given in the 3D BIM-model reference frame, O_T , to the Coppeliasim reference frame, O_C , we need to identify the transform between the frames, ${}^C T_T$. O_p is a frame that is fixed in the 3D BIM-model of the rebar cage. By expressing the transformation to O_p in 3D BIM-model, giving ${}^T T_p$, and in Coppeliasim, giving ${}^C T_p$, the frame desired transformation ${}^C T_T$ can be determined.

6.1.1. Coordinate transformation

Rigid objects in space can be described by their position and orientation. The combination of position and orientation is usually referred to as the *pose* of the object. A *frame* is a Cartesian coordinate system, i.e., a set of orthogonal axes which intersect at a point known as the *origin*. The pose of an object is expressed in a reference frame that uniquely identifies the object in space.

All frames in space in the extracted data from the 3D BIM-model digital model, including the gripping and tying frames are with respect to the reference frame in the 3D BIM-model. Hence, for these frames to refer to the corresponding frames in the Coppeliasim model, it is necessary to develop a transformation matrix [20] between the 3D BIM-model reference frame and the Coppeliasim reference frame.

The homogeneous transformation matrix, ${}^C T_T$, is a 4×4 matrix that maps frames defined with respect to the 3D BIM-model reference frame to the corresponding frame with respect to the Coppeliasim model reference frame, see Fig. 8.

The transformation matrix is defined as follows

$${}^C T_p = {}^C T_T \cdot {}^T T_p \Rightarrow {}^C T_T = {}^C T_p \cdot {}^T T_p^{-1} \quad (3)$$

where ${}^C T_p$ and ${}^T T_p$ are the 4×4 matrices representing a frame in the Coppeliasim coordinate frame and the 3D BIM-model coordinate frame, respectively.

⁶ See <https://www.coppeliarobotics.com/>

⁷ Found from <https://abb.com/>

6.1.2. Calculation of ${}^C T_T$

Looking at Eq. (3), we can find ${}^C T_T$ by identifying ${}^C T_P$ and ${}^T T_P$ for some P which is fixed in the 3D BIM-model. In this paper, we have used an A-bar in the bottom of the cage since it gives a clear direction along the cage and we already know that the z-axes align.

6.1.3. Mapping our input

In our work, the data extracted from 3D BIM-model is structured in such a way that the orientation of each point is presented in rotations around the fixed x-axis, y-axis, and z-axis, i.e., α , β , and γ format. That is to say, for a more general case where the coordinate frames assigned to the desired frames are not aligned with the reference coordinate frame in 3D BIM-model, the $R_{3 \times 3}$ element of ${}^C T_P$ is formulated as

$$R_{3 \times 3} = R_x(\alpha) \cdot R_y(\beta) \cdot R_z(\gamma) \quad (4)$$

where $R_x(\alpha)$, $R_y(\beta)$, and $R_z(\gamma)$ are the rotation matrices around x-axis, y-axis, and z-axis in the 3D BIM-model coordinate system, respectively. Then, any point with arbitrary position and rotation in 3D space in the 3D BIM-model digital model can be mapped to the corresponding point in the CoppeliaSim digital model by

$${}^C T_P = {}^C T_T \cdot \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & {}^T p \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

where ${}^C T_T$ is the pose of the desired point with respect to the 3D BIM-model and CoppeliaSim reference frames and ${}^T p = [{}^T x_p \ {}^T y_p \ {}^T z_p]^\top$ are the x, y, and z coordinates of the point with respect to the 3D BIM-model reference frame, respectively as in Fig. 8.

6.2. Sampling

We have implemented two types of random sampling. The types are i) sampling in joint space, which simply returns a position in configuration space, and ii) sampling in the workspace, where the gantry is sampled somewhere around the desired work-space position and the robot configuration is randomly selected among the available inverse kinematics solutions (if there are any).

When sampling the gantry, the distribution around the desired Tool Center Point (TCP) is not a uniform sphere for the first and third robot. Instead, we skew the distribution in the sphere towards a desired direction along the y-coordinate as well as that we make sure that the base of the robot is placed above the target. To get the base position we start from the target pose $[x_t, y_t, z_t]^\top$ and add a vector $[x, y, z]^\top$. To determine the vector to add, we sample in coordinates $[r, \varphi, \Delta z]^\top$ where the relationship to $[x_t, y_t, z_t]^\top$ is given by

$$x = r \cdot \cos(\varphi) \cdot \sqrt{1 - (\Delta z)^2} \quad (6)$$

$$y = r \cdot \sin(\varphi) \cdot \sqrt{1 - (\Delta z)^2} \quad (7)$$

$$z = r \cdot \Delta z + \text{baseHeight}, \quad (8)$$

where *baseHeight* is the height of the robot base, from mounting point to the first joint. The sampling is done according to

$$r = X \times \text{reach}, \quad \text{where } X \sim \text{Beta}(1.5, 2.5) \quad (9)$$

$$\varphi = Y, \quad \text{where } Y \sim \text{tri}(\varphi_0 - \pi, \varphi_0 + \pi, \varphi_0) \quad (10)$$

$$\Delta z = Z, \quad \text{where } Z \sim \mathcal{U}(0, 1) \quad (11)$$

where *reach* is the reach of the robot arm and φ_0 is the desired direction

in the x, y-plane. Furthermore, we have used the probability distributions⁸ (i) beta distribution $\text{Beta}(\alpha, \beta)$, (ii) triangular distribution $\text{tri}(a, b, c)$ centered around c with limits a and b , and (iii) uniform distribution $\mathcal{U}(a, b)$ between a and b . Note that if there is no preferred angle φ_0 the triangular distribution can be replaced with $\mathcal{U}(-\pi, \pi)$. We then determine $[x, y, z]^\top$ and the resulting base position is transformed into a gantry position where IK is performed to get a sample.

When sampling configurations in joint- and work-space with one or more systems, the other systems must also get a configuration. This situation happens, for example, when the tying robot is sampled to find a path between tie frames or when the placing robots are sampled to find a path for placing a rebar. In these cases, the robots which are not active in the movement must still have configurations. To implement this we have two other options for sampling. The first option is to stay still in a given configuration, as what is done by the placing robots when the tying robot is sampled for finding a tie path. The second option is to make sure that a robot is out of the way, as is done by the tying robot when the placing robots are sampled for placing the rebar. Regardless of how sampling is performed, we make sure that the system as a whole remains in a valid state, respecting the order of the different gantries and making sure that there are no collisions.

6.3. Interpolation

For the work described in this paper, we need three different modes of gantry-robot interpolation depending on the situation. The three different modes of gantry-robot interpolation are:

1. Interpolation in configuration space, where each joint variable, for robot and gantry, is linearly interpolated. This mode is used for example when tying.
2. Linear interpolation in the workspace, where the robot TCP is to follow a linear trajectory, while possibly changing its orientation. In this mode, a starting configuration for gantry and robot is supplied, as well as a goal gantry configuration. The gantry joints are interpolated linearly, while the robot joints are determined by IK along the trajectory. In cases where the orientation is changing along the trajectory, the orientation is determined using Slerp [18]. This mode is used for example when approaching a rebar.
3. Interpolation, where a rebar is being moved in the workspace and a gantry-robot system is moved to keep its TCP fixed in the rebar frame. In this mode, as in the linear mode, a start configuration for gantry and robot as well as a goal gantry configuration is provided, along with a rebar path and a grip position in the rebar frame. As the rebar is being moved in the workspace the gantry is linearly interpolated between its start and end position while the robot joints are determined using IK. This mode is used when transporting a rebar.

Note that each of the three interpolation modes can be used for one or more of the gantry-robot systems, and different gantry-robot systems can be interpolated in different modes at the same time.

6.4. Path planning

In this work, we have implemented two different types of randomized planners for use in different situations. One is a BiRRT [19,17], which we use for planning in configuration space. This is used when planning motions between different tie frames, as well as when moving robots out of the way. The other planner is the one that is used for creating robot paths to place a rebar. We refer to this as the place planner below.

The job of the place planner is to create gantry-robot paths for a

⁸ Note that in this paper the selection of distributions is a result of experimentation rather than of a formal evaluation.

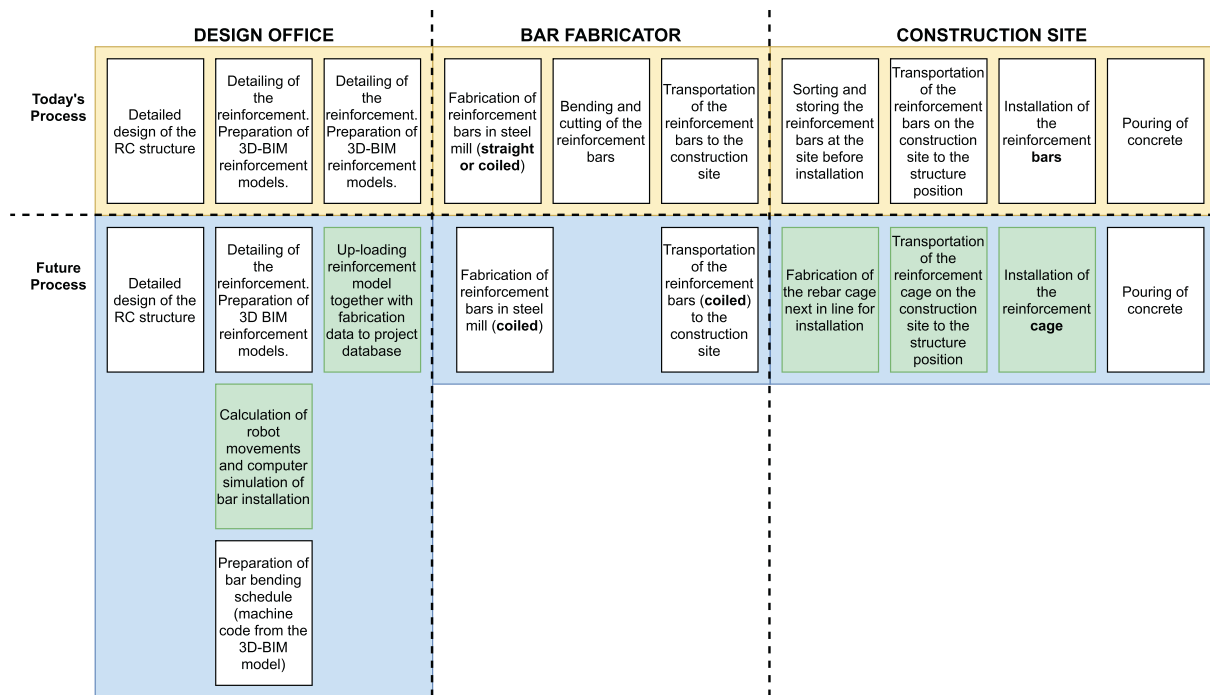


Fig. 9. Comparison of the current process, and the future process with the automated solution.

given rebar path. The rebar path is from the rebar's pose in the cage to its pose in the fixture, and it is given as a list of waypoints. Apart from the rebar path the place planner also takes grip poses relative to the rebar as well as place configurations as input.

From this input, the place planner uses a depth-first search strategy to find robot configurations along the rebar path. To do this the planner samples one set of gantry configurations for the second waypoint (workspace planning is used to make sure that the robots can reach the grip locations at the waypoint). Then, linear interpolation following the rebar is used to determine if the gantry sample can be used to generate a path for the whole system between the rebar waypoints. Once a path is found to a waypoint, the algorithm then goes for the next waypoint in the same way until hopefully reaching the goal. Note that for a given starting waypoint we try a fixed number of times to see if we can reach the next waypoint.

7. Simulation results

To determine whether the concepts that we have explained in the previous sections are feasible in CoppeliaSim or not, we have implemented them as shown in Fig. 7. Our simulation results⁹ verify that it is indeed possible to transfer the needed data from a 3D BIM-model digital model into a CoppeliaSim digital model. Moreover, we have successfully implemented the presented path planning algorithm for gripping and tying rebars. Hence, we were able to automatically fabricate the whole reinforcement rebar cage, presented in Fig. 2, bar by bar, using the gantry-robot system under the given assumptions.

8. Discussion

Fig. 2 shows a 3D BIM-model of the reinforcement in a bridge support base slab. The bridge was built a few years ago close to Stockholm, Sweden. To investigate the feasibility of fabricating rebar cages using industrial robots the reinforcement in Fig. 2 was built by robots in a 1:2

down-scaled laboratory version of the cage. Three ABB IRB 1200 robots were used for this purpose. Upon building the gantry-robot system and configuration of the gantry, the system has to be calibrated to minimize the positioning error. A method for this purpose was developed. The rebar cage digital model was imported into the ABB RobotStudio¹⁰ software for simulation of the process as well as off-line programming of the entire gantry-robot system. In the laboratory, rebars of different types were placed on a fixture where two robots could cooperatively pick and mount them on their designated positions. The third robot, i.e., the tying robot, was then able to tie the rebars together while the two other robots were holding the rebar. This process continued and the rebars were mounted and tied together with one after another until the entire cage was built. During this demonstration, we noticed several challenges some of which are mentioned in this paper and are planned to be addressed in the continued and future work.

One major challenge was to find a way to calculate the robot movements. This was a necessary step since the structures are normally one of a kind. This part of the project is what is the main part of this paper. We decided to use the software CoppeliaSim¹¹ in this part of the work because we found that it is efficient in collision detection.

Another important challenge that we noticed during the demonstration was related to tying the bars together. The tool used for this purpose needs to generate tight and stable knots. Also, the interface between the robot and the tool needs to be arranged in such a way that the two can communicate in a good way. In co-operating with the Swedish company Husqvarna, we have come across such a tying tool. This tool will be used in the upcoming laboratory testing.

We have now modified the gantry-robot system enabling the robots to move, not just in the x-y plane but also in the vertical z-direction. This modification allows the system to build more complex rebar cages. The next step in the project will be to test this modified gantry-robot system together with the algorithms for automatic calculation of the robot movements described in this paper. This testing will again be in a laboratory environment and downscaled 1:2.

⁹ A video-clip of the developed simulation scene is available at <http://www.idt.mdh.se/personal/aps01/research/robotics/constructionRobots.mp4>

¹⁰ <https://new.abb.com/products/robotics/robotstudio>

¹¹ <https://www.coppeliarobotics.com/>

As explained in the previous sections, the presented robotic system is not a mobile platform in the sense that it is going to move around the construction site. This robotic system is complemented with a bar bending and cutting machine, and is going to be built somewhere on-site to pre-fabricate the rebar cages. Furthermore, if for some reason it is not possible to build such a station on-site, the rebar cages can still be pre-fabricated off-site and transported to the site, as it is done in some construction projects already today, albeit that these cages are fabricated manually.

The deployment of robotic solutions on a construction site is complicated. Moreover, there are also issues regarding the impact on the construction process. The solution that we propose can be compared to pre-fabrication close to the construction site. This reduces the problem of having a robot or a system of robots moving around the construction site into the problem of moving reinforcement cages around the site, something which has been tried before. With this perspective, we chose to tackle the technical problem of rebar installation, to begin with.

The proposed approach can have a significant impact on the schedule of a construction project, and the end-to-end process. Fig. 9 shows a summary of the different stages of a generic construction project, comparing the traditional approach (in the first row) to the envisioned future process. The current and future processes are based on [21], [22], [23], where the digitalization/automation of a construction process has been analyzed. The coloured cells of Fig. 9 highlight the activities that will be either introduced or affected due to the proposed solution. Note that, in the future process, a more advanced level of digitalization/automation is required as the 3D BIM-model will be used to generate the robot program to fabricate the rebar cages.

9. Conclusion and future works

In this paper, we have presented how to transfer data (model transformation) from a 3D BIM-model of a reinforcement cage (consisting of a set of rebars) to corresponding models in CoppeliaSim. Moreover, we have presented path planning algorithms for transporting and tying these rebars. Our proposed approach was under the assumption that the gantry, the robot, and the rebars are completely stiff and ideal. Our simulation results, under such assumptions, verify that the concept successfully operates as envisioned. Additionally, to get a better insight into the potential challenges in bringing to life such an idea, we decided to manually fabricate the exact cage used in the simulation. In this manual fabrication, we observed several challenges which are yet to be addressed by our algorithms in future research. We would call them “transition to the real world”. These challenges include, but may not be limited to:

- automated extraction of the required data, e.g., gripping points and tying points, from the digital model of the rebar cage,
- automated generation of the rebar installation order, i.e., how to place the bars one after another such that building the cage is feasible,
- path planning for placing rebars and for tying rebars when they are not assumed to be ideal anymore, and
- adapting a tying tool to be used together with the industrial robots.

For the simulation described in this paper, we have extracted the data from the 3D BIM-model manually. This is a very tedious task given the fact that the reinforcement cages normally include many bars, e.g., the model that we have used for the simulation described in this paper includes more than 200 rebars. In addition to extracting the data, for fully automatic fabrication of the reinforcement cage, it is necessary to automatically generate a valid order for placing the rebars one after the other such that fabrication of the reinforcement cage is indeed feasible, i.e., without any collision. Finding such an order is a challenging problem given the fact that there is a large number of rebars to place, meaning that a pure combinatorial search is not possible and/or

extremely time-consuming. Hence a heuristic solution should be implemented.

The path planning algorithm described in this paper assumes that the bars, the gantry, and the robots are ideal and stiff. However, in the real world, the rebars, the gantry, and the robots are more or less flexible. Moreover, they likely deflect due to gravity. The deflection of the rebars, being relatively big, must be taken into account in the collision checking algorithm. In addition to that, the rebar deviations with respect to their theoretical geometry will affect their final positions in the cage which need to be considered when tying the bars together.

After placing a rebar in its correct position, it must be tied into place using a tying tool. The tying tool which we are currently using is a tying tool meant for manual tying which later has been adapted for robotic applications. Several important aspects should be taken into account with any tying tool: (i) quality and tightness of the knots, (ii) tolerance of the tool meaning that how close the two bars should be to each other for the tying tool to be able to tie them together tightly, and (iii) giving a reliable feedback signal such that we know that the bars are tied tight enough together and the process has finished properly. The tightness of the knots is, however, of particular importance. Based on our observations, if the rebars are not tied together tight enough, they will displace from their position. This displacement, in return, can cause some serious problems. These problems are, but not limited to:

- Tying failure because of the tying point displacement. In other words, it won't be possible to tie the next rebar to the already displaced rebar from the pre-defined tying point, and
- Collision of the robot and/or the next rebar(s) with the displaced rebar.

In our simulation, we have yet to equip the robots with tools, as these tools are still in development. The idea, however, is to use the middle robot for tying and the two other robots for pick and place of the rebar. We are also looking into developing tools that work for both gripping and tying which would make it possible to use all three robots for either task. Another way to increase flexibility in terms of what each robot can do is to use a tool changer for one or more robots.

In summary, our future work will include, among other things a) Automatic generation of the required data, b) Dealing with deviations of the robot, gantry, and the rebars from their theoretical geometry, c) Investigating the possibility of modifying the digital model and considering the addition of a stable frame so that the rebars are fixed in their final position, even when the knots are not tied tight enough.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgements

This work was supported by the Knowledge Foundation (KKS) with the Automation Region Research Academy (ARRAY) (grant ID: 20170214) and Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF) (grant ID: 13666).

References

- [1] E. Rohmer, S.P.N. Singh, M. Freese, V-rep: a versatile and scalable robot simulation framework, in: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013, pp. 1321–1326, <https://doi.org/10.1109/IROS.2013.6696520>.
- [2] M. Pan, T. Linner, W. Pan, H. Cheng, T. Bock, Structuring the context for construction robot development through integrated scenario approach, *Autom. Constr.* 114 (3) (2020) 10–21, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103174>.

- [3] A. Warzawski, D.A. Sangrey, Robotics in building construction, *J. Constr. Eng. Manag.* 111 (3) (1985) 260–280, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(1985\)111:3\(260\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(1985)111:3(260)).
- [4] W. Leyh, Experiences with the construction of a building assembly robot, *Autom. Constr.* 4 (1) (1995) 45–60, [https://doi.org/10.1016/0926-5805\(94\)00034-K](https://doi.org/10.1016/0926-5805(94)00034-K).
- [5] B. Dolinšek, J. Duhovnik, Robotic assembly of rebar cages for beams and columns, *Autom. Constr.* 8 (2) (1998) 195–207, [https://doi.org/10.1016/S0926-5805\(98\)00083-1](https://doi.org/10.1016/S0926-5805(98)00083-1).
- [6] J. Relefors, M. Momeni Kelageri, L. Pettersson, E. Hellström, A. Thunell, A. V. Papadopoulos, T. Nolte, Towards automated installation of reinforcement using industrial robots, in: *IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 2019, pp. 1595–1598, <https://doi.org/10.1109/ETFA.2019.8869343>.
- [7] A. Abou Yassin, F. Hamzeh, F. Al Sakka, Agent based modeling to optimize workflow of robotic steel and concrete 3D printers, *Autom. Constr.* 110 (2020) 103040, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103040>.
- [8] P.F. Martins, J. Sousa, Digital fabrication technology in concrete architecture, in: *Proceedings of the 32nd Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe Conference (eCAADe)*, 2014, pp. 475–484 (Date accessed: 28/04/2021). URL http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/Show?ecaade2014_239.
- [9] D. Asprone, C. Menna, F.P. Bos, T.A. Salet, J. Mata-Falcón, W. Kaufmann, Rethinking reinforcement for digital fabrication with concrete, *Cem. Concr. Res.* 112 (3) (2018) 111–121, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.020>.
- [10] N. Hack, K. Dörfler, A.N. Walzer, T. Wangler, J. Mata-Falcón, N. Kumar, J. Buchli, W. Kaufmann, R.J. Flatt, F. Gramazio, M. Kohler, Structural stay-in-place formwork for robotic in situ fabrication of non-standard concrete structures: a real scale architectural demonstrator, *Autom. Constr.* 115 (3) (2020) 103197, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103197>.
- [11] O. Kontovourkis, G. Tryfonos, Robotic 3D clay printing of prefabricated non-conventional wall components based on a parametric-integrated design, *Autom. Constr.* 110 (3) (2020) 103005, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103005>.
- [12] L. Larsen, M. Kaspar, A. Schuster, M. Vistein, J. Kim, M. Kupke, Full automatic path planning of cooperating robots in industrial applications, in: *IEEE Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, 2017, pp. 523–530, <https://doi.org/10.1109/COASE.2017.8256157>.
- [13] M. Vistein, D. Deden, R. Glück, S. Schneyer, Automated production of large fibre metal laminate aircraft structure parts, *Procedia Manuf.* 38 (2019) 1300–1307, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.160>.
- [14] M. Ghallab, D. Nau, P. Traverso, *Automated Planning: Theory and Practice. The Morgan Kaufmann Series in Artificial Intelligence*, Elsevier Science, 2004. ISBN: 9780080490519.
- [15] B. Miloradović, B. Cürüklü, M. Ekström, A.V. Papadopoulos, A genetic algorithm approach to multi-agent mission planning problems. *Operations Research and Enterprise Systems*, Springer International Publishing, Cham, 2020, pp. 109–134, https://doi.org/10.1007/978-3-030-37584-3_6.
- [16] B. Miloradović, B. Cürüklü, M. Ekström, A.V. Papadopoulos, GMP: a genetic mission planner for heterogeneous multirobot system applications, *IEEE Trans. Cybern.* (2021) 1–12, <https://doi.org/10.1109/TCYB.2021.3070913>.
- [17] S.M. LaValle, *Planning Algorithms*, Cambridge university press, 2006, <https://doi.org/10.1017/CBO9780511546877>. ISBN: 9780511546877.
- [18] K. Shoemake, Animating rotation with quaternion curves, in: *Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH*, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1985, pp. 245–254, <https://doi.org/10.1145/325334.325242>.
- [19] J.J. Kuffner, S.M. LaValle, RRT-connect: an efficient approach to single-query path planning, in: *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 2, 2000, pp. 995–1001, <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2000.844730>.
- [20] W. Khalil, E. Dombre, *Modeling, Identification and Control of Robots*, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2002, <https://doi.org/10.1016/B978-1-903996-66-9.X5000-3>. ISBN: 978-1-903996-66-9.
- [21] D. Engström, H. Hyll, J. Fredsdotter, R. Larsson, *Armering I Byggprocessen - Effektivisering Av Informationshanteringen (reinforcement in the construction process - streamlining data management)*, Tech. rep., NCC Teknik, 2011 (Date accessed: 29/09/2021), URL <http://www.armera.se/pdf/slutrappport>.
- [22] D. Castro-Lacouture, M. Skibniewski, Implementing a B2B e-work system to the approval process of rebar design and estimation, *J. Comput. Civil Eng.* 20 (2006) 28–37, doi:10.1061/(ASCE)0887-3801(2006)20:1(28).
- [23] D. Castro-Lacouture, B2B e-work intranet solution design for rebar supply interactions, Ph.D. thesis, Purdue University, 2003 (Date accessed: 29/09/2021), URL <https://docs.lib.purdue.edu/dissertations/AAI3113780/>.

On the Bar Installation Order for the Automated Fabrication of Rebar Cages

Mahdi Momeni¹, Johan Relefors², Lars Pettersson³, Alessandro V. Papadopoulos¹, and Thomas Nolte¹

¹Mälardalen University, Västerås, Sweden

²Solving Robotics Sweden AB, Västerås, Sweden

³Skanska Sweden AB, Stockholm, Sweden

mahdi.momeni@mdu.se

Abstract -

Robotics automation is a promising solution for the fabrication of structures made out of reinforced concrete. The reinforcement is often installed directly in the form and bar-by-bar. Using bigger pre-fabricated units (cages) may be beneficial for saving construction time and better labor safety. In this paper, we focus on the problem of automating the generation of a plan for the installation of rebars, given the digital twin of a desired reinforcement cage design, and of its basic components. More specifically, the plan describes the assembling order for the rebars such that (i) it is possible to fabricate the reinforcement cage by the robots, and (ii) the end product is the final reinforcement cage, ready for installation in the form for the concrete structure. In this paper, we propose an algorithm to automatically compute a feasible installation order for a generic rebar cage. The feasibility of the generated order is also case studied and simulated on a simplified rebar cage under the given assumptions.

Keywords -

Robotics for construction; Rebar installation; Automation

1 Introduction

The process of installing reinforcement bar-by-bar in reinforced concrete structures is time-consuming and potentially harmful to the workers' safety. Pre-fabricating the reinforcement in bigger units (often referred to as "cages") and placing them in the form may help save construction time. Automatic fabrication of rebar cages can improve the construction time even further, and introduce other benefits, e.g., improved safety of construction workers.

One of the major challenges in automating rebar cage fabrication is that they are high mix and low volume. Automation cannot rely on repeating the same motions over and over, but a higher degree of flexibility is required. This challenge can be divided into two major challenges. First, the adopted industrial robots require accurate motion planning that cannot be easily reused between one cage and another. Second, the ordering sequence of one cage can significantly differ from another one. This calls for novel algorithmic approaches that can handle such flexibility.

In [1], we explored how the first challenge can be addressed, by automatically generating motions for a gantry-robot setup with 27 degrees-of-freedom (DOFs), shown



Figure 1. Gantry robot system.

in Fig. 1. However, the installation order was manually determined for the specific cage used in the experimental demonstration, therefore limiting the possibility of reusing the same solution for different types of cages.

In this paper, we focus on the problem of identifying a feasible installation order, given a generic rebar cage. "Installation order" refers to the determination of how and in what sequence the rebars should be placed to assemble the cage. If no such *valid order* exists, or if one cannot be found, the cage is considered not *robotically fabricable*. A valid order should take into consideration the gripping as well as tying poses while ensuring that collision-free paths for placing the rebars exist. Moreover, it should ensure that the rebar cage remains stable during fabrication and at the end of the process. Several valid installation orders may exist but in this context finding one such order is enough.

2 Background

In [2], the authors used Constraint Satisfaction Problem (CSP) to formulate sequence and motion planning problems (SAMP) for spatial extrusion of 3D trusses. The authors present an automated approach to finding an extrusion sequence. The sequence in their work refers to the order of the end-effector's feasible direction for each extrusion direction. In this paper, however, the sequence refers to the order of placing rebars one after another.

In [3], the authors present an automated planning ap-

proach to find a construction sequence and plan robot motion jointly for additive manufacturing. In their work, the construction sequence is defined as an ordering of the elements which are welded or glued together at their ending. Besides, their work deals only with straight elements. In this work, the considered rebars can be connected at any point on the bar and the rebars can have different shapes.

In [4], the authors presented a fabrication process method based on a cooperative assembly approach. They use two robots to cooperatively fabricate a full-scale vault brick-by-brick with identical bricks. The construction sequence is designed taking into account the temporary stability of neighboring brick assembly while maintaining global stability. Their approach is developed based on the principle that the added self-weight should be efficiently transferred to the foundation. In our work, the rebar cage is built using a gantry robot system (shown in Fig. 1). In addition to that, a rebar cage in our problem can contain hundreds of rebars, many of them of different types.

The problem of finding the bar installation order is split into two sub-problems: (i) finding a way to deal with a large number of ordering possibilities, which is a combinatorial problem, and (ii) finding gripping and tying poses, as well as the robots' trajectories. More specifically, we analyze a rebar cage structure to reduce the complexity of the problem by reducing the search space. To this end, we order the rebars based on the geometry of the rebars and the way that the path planning algorithm presented in [1] works. We test this ordering on a simplified cage. The input used is a digital twin of the cage, i.e., a digital version of the cage where all necessary bars are present. More specifically, the digital twin contains the position and geometry of all the bars in the cage. Each bar has a unique ID which is defined using information such as: (i) the bar mark which contains information regarding the bar shape type and a serial number which identifies a group of identical bars; (ii) a serial number identifying an individual bar in a group of identical bars; and (iii) the way the bar should be fixed to other bars, e.g., welding or tying.

The remainder of this paper is organized as follows. Section 3 presents the problem addressed in this paper. Section 4 describes the methodology developed to compute the bar installation order. Section 5 discusses the obtained results, and Section 6 concludes the paper.

3 Problem Statement

The problem of finding a rebar placement sequence from a digital twin can be formulated as follows:

Given the digital twin of a rebar cage and an automation system, find a feasible order in which the bars can be installed by the system, one after another, to fabricate the entire rebar cage.

Finding such a sequence is far from being trivial, due

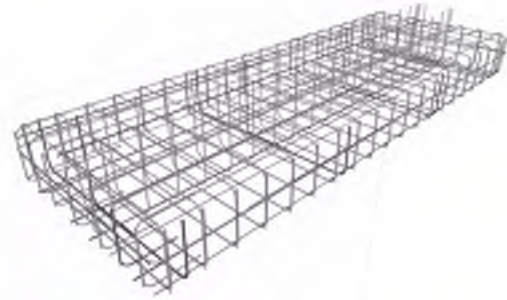


Figure 2. The digital twin of a cage.

to its combinatorial nature [5]. The main focus of this work is to investigate ways of reducing such complexity by exploiting the nature of the problem and the domain knowledge and expertise. In particular, in this paper, we focus on finding an installation order for a single cage while using rebar trajectories that are compliant with the trajectories of the path planning algorithm proposed in [1].

We are then looking for an installation order for a cage with the following constraints and assumptions:

1. The rebars are placed following vertical movements complying with the path planning algorithm in [1].
2. The rebar should remain connected to, at least, one other rebar from either the same or another layer at each installation step, except for the rebar(s) in the first layer which is(are) assumed to rest on the ground and may not connect to another rebar (s).
3. The rebars are stiff, i.e., their geometry corresponds to the geometry given by the digital twin.

In theory, the number of installation orders is equal to the factorial of the number of rebars in each cage. Rebars enumeration to solve the problem is therefore not possible. We are interested in finding one feasible solution and thus, orders evaluation can be stopped as soon as a solution is found. This suggests using a backtracking and Depth-First Search (DFS) [6] algorithm to solve the problem.

To further analyze the structure of the problem, we look at all states that the cage can assume during fabrication, denoting this as the *states of a cage*. A key observation is that the same state of the cage can be part of different installation orders. The history of how the cage came to a state is not important. Saving the computations following a certain state of the cage means that the computations following from that state do not have to be performed again if another order leads to the same state of the cage.

Summarizing the analysis, the problem is well suited for a DFS algorithm. Furthermore, saving any computations made during the search to be re-used is important since the same state of a cage can be visited more than once. Finally,

Algorithm 1: Forward Method Algorithm.

```

input :  $DT$  = Digital Twin
output :  $R$  = Placement Sequence

1  $Rebar \leftarrow RebarData(DT)$ ; /* Determines
   rebar parameters: ID, type, and
   position w.r.t the system coordinate
   frame */
2  $[s, Z] \leftarrow Layers(Rebar)$ ; /*  $s$ : Number of
   layers,  $Z$ : HLs coordinates, each layer
   includes HLs with the same
    $z$ -coordinates */
3 for  $j \leftarrow 1$  to  $s$  do
   // find all the rebars with at least
   one Horizontal Leg in layer  $j$ 
4    $tmp \leftarrow RebarsInEachLayer(Z(j))$ ;
   // sort rebars based on their "x-",
   "y-" and "z-" coordinates
5    $SortedRebars(j) \leftarrow SortRebars(tmp)$ ;
   /* from left to right */
6 end
7  $R \leftarrow SortedRebars$ 

```

the criteria of complying with the path planning algorithm mean that the DFS should be guided in a direction where blocking yet-to-be-placed rebars are avoided.

4 Methodology

In this section, we present a heuristic to compute the bar installation order that we call the *Forward Method*, presented in Algorithm 1. In this method, rebars are added one by one starting from scratch. This can be compared with the *Backward Method*, presented in [7], which is based on the main principle of disassembling the cage.

As motivated in the previous section we are going to use a depth-first search to find an installation order. The search needs to be guided in a way that increases the likelihood of finding a feasible installation order. This means that the path planning algorithm has to be taken into account.

The planning algorithm is designed to place rebars by moving them straight down, followed by an approach movement. Looking at a cage from above, the horizontal rebar legs have a larger surface area than the vertical rebar legs. We interpret this to mean that horizontal legs in a partially assembled cage are more likely to block the installation of further rebars. This is especially true for horizontal legs which are at the top of the cage.

To use this idea to guide the search algorithm we assign a height coordinate to each rebar, denoted as the Z -coordinate of the rebar, as the height of the top horizontal leg of the rebar. The height is defined with respect to the

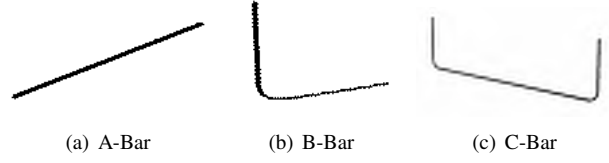


Figure 3. Different rebar types used in this paper.

system coordinate frame which can be arbitrarily placed anywhere on the floor. We then initialize the search algorithm with a list of rebars where the order is from lower to higher Z -coordinate. The list is then used in the search by adding rebars to the cage in the order in which they show up in the list.

There may be, and often is, many rebars with the same Z -coordinate in a cage. We denote collections of rebars with the same Z -coordinate as being in the same *layer*. In a given layer the order in which the rebars should be placed is not guided by the Z -coordinate. This freedom is used by ordering the rebars in a given layer by their distance to the origin of the system coordinate.

The inclusion of an arbitrary origin may seem strange at first. The rationale is that starting from some point in space should maximize the size of free space around the rebars in a partially constructed cage. Note, however, that changing the position of the origin can affect both the installation order and the convergence of the search.

5 Results and Discussion

The pseudo-code of the Forward Method algorithm is explained in Algorithm 1. We used MATLAB[®] to implement the algorithm. To test the algorithm, we have chosen the digital twin of a reinforcement cage, see Fig. 2, which was designed for a bridge structure in Stockholm, Sweden. For the sake of this paper, we simplified the cage to the one with fewer rebars (from 198 bars in the original one down to 44 bars), see Fig. 4. Noting that there might be a loss of generality with any simplification, this simplification is done for the digital twin to be imported to MATLAB[®] for a faster prototyping phase. For the final product, however, the software we are working on is being developed in C++ and will take the original digital twin directly as the input.

The simplified cage contains three types of bars, shown in Fig. 3. For this case study, the algorithm can find a sequence without backtracking in the depth-first search. An order is also produced regardless of the position of the coordinate frame. An example can be found in [8]. There are overall 8 different layers in this case study, as shown in in Fig. 4. which means that the cage will be fabricated in 8 different stages. The required number of robot's translational movement to fabricate the cage, however, is equal to the number of rebars in a cage.

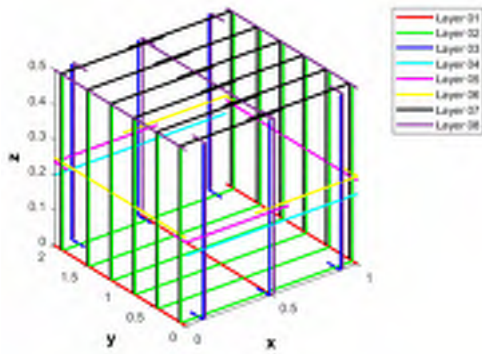


Figure 4. The simplified model of the cage in Fig. 2.



Figure 5. A row of 6 bars of two different types.

Unlike the presented case study, we can find cases where the position of the origin affects the number of branches that need to be explored in the search. An example is given by the collection of rebars shown in Fig. 5 which contains 6 rebars. Depending on whether the origin is set to O1 or O2 the number of branches that need to be explored and backtracking differs.

6 Conclusion

Finding a valid installation order so that the robots can automatically fabricate a reinforcement rebar cage is a challenging task. Especially if we take into account the gantry robot's trajectory to install the rebars as well as all the many different rebar types. We, therefore, tried to split the problem into two subproblems of (i) finding a sequence(s) of rebar placement as an initial starting point, and (ii) verifying that the determined sequences are executable by gantry-robot systems. We addressed the first part of the problem in this paper and presented an algorithm to find a sequence(s) for placing the rebars in a cage.

Theoretically, the problem of finding the bar installation order is combinatorial with respect to the number of rebars in the cage. This paper proposes a heuristic to be able to compute a feasible solution. The executability of the solution has been simulated on a simplified cage. The solution, however, may not necessarily be the fastest possible solution to fabricate the cage as we are not aiming at an optimal solution at this stage but rather a feasible one.

The presented algorithm requires the rebars to be connected in each step of the assembly process. This is a relaxation of the cage's stability requirement in each step. This relaxation will be addressed in future work.

We also need to address the second part of the problem. One idea in that direction is to use the algorithm presented in this work to produce several different installation orders, possibly by moving the origin into different locations, and see if any of these orderings is fully compatible with the path planning used for the gantry-robot system.

7 Acknowledgment

This work was supported by the Knowledge Foundation with the Automation Region Research Academy (AR-RAY) and SBUF.

References

- [1] M. Momeni, J. Relefors, A. Khatry, L. Pettersson, A.V. Papadopoulos, and T. Nolte. Automated fabrication of reinforcement cages using a robotized production cell. *Automation in Construction*, 133:103990, 2022.
- [2] Y. Huang, C.R. Garrett, and C.T. Mueller. Automated sequence and motion planning for robotic spatial extrusion of 3D trusses. *Contr. Rob.*, 2:15–39, 2018.
- [3] Y. Huang, C.R. Garrett, I. Ting, S. Parascho, and C.T. Mueller. Robotic additive construction of bar structures: unified sequence and motion planning. *Contr. Rob.*, 5:115–130, 2021.
- [4] Stefana Parascho, Isla Xi Han, Samantha Walker, Alessandro Beghini, Edvard P. G. Bruun, and Sigrid Adriaenssens. Robotic vault: a cooperative robotic assembly method for brick vault construction. *Contr. Rob.*, 4:117–126, 2020.
- [5] L. Nägele, A. Hoffmann, A. Schierl, and W. Reif. LegoBot: Automated planning for coordinated multi-robot assembly of LEGO structures. In *IEEE/RSJ Int. Conf. Int. Robots and Syst. (IROS)*, pages 9088–9095, 2020.
- [6] S.J. Russell and P. Norvig. *Artificial intelligence: a modern approach*. Pearson Education Limited, 2016.
- [7] J. Relefors, M. Momeni, L. Pettersson, A.V. Papadopoulos, and T. Nolte. Installation order in automatic fabrication of reinforcement rebar cages. In *IEEE Conf. Emerging Tech. and Factory Aut. (ETFA)*, pages 1–4, 2021.
- [8] Simulation video. <http://www.idt.mdh.se/~aps01/research/robotics/2022-BarInstallationOrder.mp4>. Accessed: 2022-06-28.

On Finding an Installation Order for the Reinforcement Bars Used in Concrete Structures - An Algorithmic Approach

Mahdi Momeni^{a,*}, Johan Relefors^b, Lars Pettersson^c,
Alessandro V. Papadopoulos^a, Thomas Nolte^a

^a*Mälardalen University, Västerås, Sweden*

^b*Enodo Robotics AB, Västerås, Sweden*

^c*Skanska Sweden AB, Stockholm, Sweden*

Abstract

Automated fabrication of reinforcement cages using industrial robots requires that the robot paths for installing the reinforcement bars (rebars) are automatically developed. As presented in an earlier paper, this can be done using calculations based on the cage's digital twin information. To calculate the robot path, the installation order of the rebars needs to be known. However, there are $N!$ possible installation orders for a given cage where N is the number of rebars in the cage. Adding to this problem, the number of bars in a rebar cage is often big. In this paper, a heuristic approach to reduce the number of possible installation orders to a manageable amount is presented and tested in a computer environment on a study cage.

Keywords: Automated Construction, Construction Robotics, Reinforcement.

*This work is funded by the Swedish Knowledge Foundation (KKS), the Development Fund of the Swedish Construction Industry (SBUF), and Mälardalen University.

*Corresponding author

Email addresses: mahdi.momeni@mdu.se (Mahdi Momeni), johan@enodorobotics.se (Johan Relefors), lars.g.pettersson@skanska.se (Lars Pettersson), alessandro.papadopoulos@mdu.se (Alessandro V. Papadopoulos), thomas.nolte@mdu.se (Thomas Nolte)

1. Introduction

The construction industry has a long tradition of manual work utilizing skilled labor. Despite the potential benefits of automation, the construction industry has witnessed only a few examples of using robots to automate (parts
5 of) construction activities over the past years. One of the reasons for this may be that unlike what is common in the traditional manufacturing industry, where identical products are being produced in large numbers, the structures in the construction industry are often one of a kind. The structures are typically designed for site and structure-specific conditions and loads.

10 One example of construction activity is the installation of reinforcement bars (rebars) in concrete structures. This activity happens before pouring the concrete into the formwork. This installation is time-consuming, heavy, and labor-intensive.

To reduce construction time and the amount of heavy installation work, the
15 bars can be assembled off-site in larger units, often referred to as reinforcement cages. Before pouring the concrete, these cages are lifted into the formwork using cranes. To (pre-)fabricate rebar cages can be beneficial from an effectiveness perspective and (to a certain extent) from a health and safety perspective of labor. Like the structure that the cage will be built into, it is normally one of a
20 kind. In some cases, several cages are the same, but it is important to note that the number of identical cages is normally small, even if this may be the case.

When rebar cages are used in construction projects today, they are fabricated manually, normally bar by bar. In some cases, parts of the cages are fabricated from, for example, rebar nets (mats) that are fabricated using purpose-made
25 machines. However, a machine that can fabricate a complete cage is not currently available in the market.

In cooperation with ABB, the construction company Skanska has, for several years (since 2014), studied the possibility of developing a machine that can fabricate rebar cages. Of particular interest in these studies has been the use
30 of industrial robots. In the early stages of the project, it was decided that the

machine should consist of a gantry having three robot arms hanging upside-down. In its first version, the gantry was designed only to enable the robot arms to move in the horizontal plane.

If robots are used to fabricate the cages, they can be programmed for each cage with a new design. In practice, however, this is not a feasible solution. A path planner for moving a reinforcement bar from a pick-up position to its final position in the cage was therefore developed for this first version and was reported in [1]

The gantry was re-designed as part of the project “Automated Construction – Reinforcement” (AC-R) [2]. The re-design consisted of adding a z-axis for each of the three robots allowing them to move in the vertical direction. This set-up’s laboratory version was built and described in [1]. The path planner was further developed within the AC-R project to take advantage of the added z-axis.

A fully automatic machine that builds rebar cages needs to know the path for all the bars in the cage and the installation order of the bars. Given a cage with N rebars, there are $N!$ possible installation orders. However, most possible installation orders are invalid, so installing the rebars in that order is impossible, given the rebar assembly machine and the developed path planner.

Since N is normally large, testing the complete set of orders until a valid one is found is not feasible. For example, a cage with 100 bars has more than 10^{157} possible orders. The number of candidate orders needs to be reduced by generating likely valid installation orders. These likely valid installation orders can be tested using the path planner. Once the path planner finds one candidate where the robots can install all the bars, we denote it as a valid installation order and stop searching for new installation orders.

An algorithmic solution to this problem is presented and tested in this paper. We also discuss ways to eliminate as many of the unlikely installation orders as possible. The proposed solution is successfully tested on a realistic rebar cage.

The outline of the paper is as follows. Section 2 describes the background, followed by related work in Section 3. In Section 4, we describe the problem

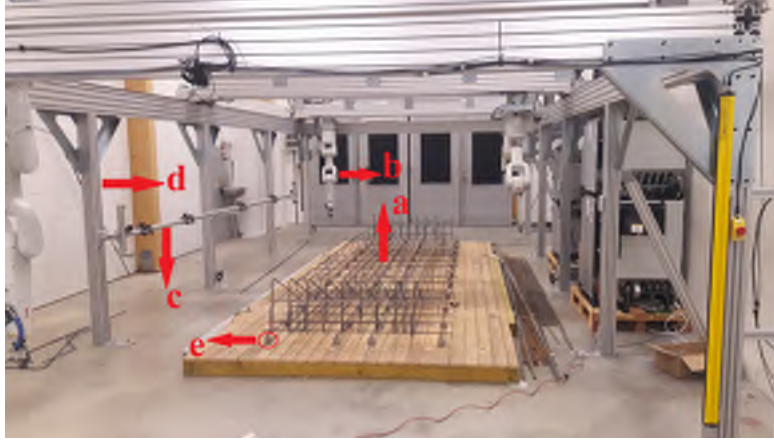


Figure 1: Gantry-robot system in the lab: a) down-scaled robotically fabricated cage, b) ABB IRB 1200 industrial robot, c) fixture, d) gantry's column, e) support stand.

addressed in the paper, and in Section 5, we present an algorithmic approach to find a candidate solution to the problem. We evaluate the proposed algorithm with a simplified cage and show the results in Section 6. Conclusions and future
65 works are presented in Section 7.

2. Background

In the construction industry, concrete structures used in, for example, bridges or tunnels, are made using a formwork that is filled with concrete and one or more rebar cages that, in turn, are made out of steel reinforcement. Every re-
70 bar cage is designed for specific loads and site conditions and, thus, uniquely designed with special considerations. In other words, opposite to the manufacturing industry using robots to produce a large number of the same entity, the robotic system in our context is supposed to be able to automatically fabricate one single unit (rebar cage), not performing repetitive tasks even if the latter, of
75 course, is fully possible. This means that every path and trajectory for placing every rebar may be unique for every cage, and the automation system cannot simply rely on following the same motions repetitively. The automation system requires a higher degree of flexibility. Hence, looking at the context and overall

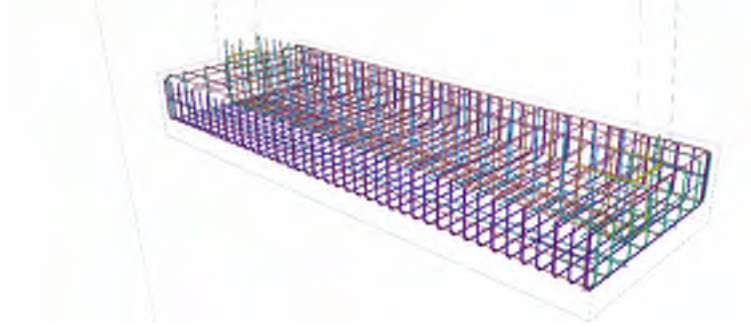


Figure 2: The digital twin of a real cage used in a construction project in Stockholm.

application of automated construction, an important challenge is developing a
 80 *flexible automation system* for fabricating *unique* cages.

In addition, every rebar cage is unique in its structural design and details, such as the rebar types [1], dimension, and diameter. Adding to that, every rebar in every cage will be connected, either by welding or tying, in different positions. In other words, the rebar connection points have different coordinates
 85 in 3D space in different cages and one unit. For this research, we assume that welding is used. Please note that the bars are welded to each other not to move during concrete pouring.

To fabricate a rebar cage, the rebar placement should follow a specific order that includes their designated position in the overall cage structure and the
 90 welding points' positions. This is even more challenging when a robotic system is fabricating the cage. In this case, the gripping points (the locations on a rebar where the robots grip the rebar) should also be considered. More importantly, the rebars should be placed in an order that avoids any possible obstacle and any collision between the rebars and the gantry-robot system.

95 The above considerations suggest that the adopted gantry-robot system requires an accurate *path planning algorithm* flexible enough for different cages. On the other hand, the path planning algorithm requires an *installation order* as one of its input arguments. Because the rebar placement sequence can be completely different from one cage to another, an algorithmic approach is re-

100 quired to handle such flexibility. For that purpose, we split the problem into two sub-problems: *i*) an algorithmic path planner, and *ii*) an algorithmic rebar placement sequence generator.

We have previously addressed the first sub-problem in [1]. In this paper, however, we address the second sub-problem. We propose an algorithmic ap-
105 proach to generate a candidate installation order given a rebar cage’s digital twin. The digital twin concept was first introduced in 2017 [3] and generally means a realistic digital representation of assets, processes, and systems with a defining characteristic of a data connection between the real world and its digital representation [4]. In this context, we refer to the 3D CAD model of
110 the rebar cage as the digital twin, where the general geometric representation of the rebar cage, such as the positions, orientations, and type of the rebars, are presented.

Through this paper, installation order refers to a sequence that determines how and in what order the rebars should be placed one after another so that
115 the adopted gantry-robot system can fully fabricate the cage.

Note that several candidate solutions may exist for a given rebar cage. Upon finding such orders, they should be validated by the first sub-problem, i.e., given the installation order, the path planner should be able to find a complete obstacle-free path for every rebar, and the adopted gantry-robot system should
120 be able to fabricate the cage. The first validated solution is the one used for the fabrication.

3. Related Work

This section highlights work related to the research presented in this paper. Firstly, looking at task planning, the Planning Domain Definition Lan-
125 guage (PDDL) [5] is known to be a standard encoding language for planning tasks. Planning tasks in PDDL are separated into two files, namely “*domain file*” and “*problem file*”. Domain file includes *predicates* and *actions* while problem file includes *objects*, *initial states*, and *goal specification*. Even though one

may consider developing a PDDL to find an installation order, it can be extremely challenging as “actions” must be well-defined, but, as we will show in Section 2, the actions are not well-defined. Therefore, PDDL can’t solve the installation order problem on its own.

The complexity of assembly sequencing has been studied and addressed in several papers. The authors in [6] show that given a collection of parts (rigid objects) and a composite object comprised of the parts, determining a sequence of motions that assembles the parts into the composite is PSPACE-difficult if arbitrary sequences are allowed [6]. In particular, they study a case of motion planning where there are no obstacles, i.e., any object in the scene of interest can be moved. Another study showed that it is NP-complete if the body’s motions are restricted to multi-step translations and other variations [7]. Additionally, the authors in [6] define the *required number of hands* as the number of simultaneous and independent motions needed to assemble a composite. They show that “for any integer n , there exists a composite of polygons in the plane that requires n hands to be assembled by motions in the plane”. We decided early on to use three industrial robots to fabricate the rebar cages, two to grip rebars and one to weld rebars.

Assembly sequencing can also be found via the assembly-by-disassembly strategy, which prevails in the literature on assembly planning [8, 9, 10, 11, 12, 13]. In [14], the authors proposed a method based on randomized path planning algorithms. Their proposed method samples the motion directions of the parts based on their geometric information to compute the disassembly sequences considering all the parts’ disassembly paths. Their work did not discuss the algorithm’s ability to solve problems, including complex shapes. Besides, following the assembly-by-disassembly strategy, disassembly sequencing and path planning are parts of a whole problem that shall be ideally treated simultaneously. One disadvantage of this strategy is the high computational complexity of simultaneously dealing with all constructing part’s motions.

The motivation for using assembly-by-disassembly is based on the observation that the number of constraints on the components of an assembled product

160 is larger than that of its disassembled state. The larger the number of con-
 straints, the less range of assembly motions a planner should check. As far as the
 geometric constraints are concerned, and all the product’s parts are rigid, there
 is a bijection between assembly and disassembly sequences [15]. For that reason,
 finding an assembly sequence by finding the disassembly sequence (assembly-
 165 by-disassembly) strategy has been commonly used for assembly planning. One
 possibility to find a candidate installation order is to assume a fully fabricated
 cage, then try to remove the bars one-by-one until the last rebar is disassembled.
 Reversing the disassembly would give a candidate an installation order. In this
 paper, however, we look at the problem from a different perspective and try to
 170 solve the problem by an assembly (not disassembly) approach.

In another study in [16], the authors investigated the spatial extrusion of
 3D trusses. To formulate the Sequence And Motion Planning problems, also
 known as SAMP, the authors used Constraint Satisfaction Problem (CSP). The
 authors decoupled the sequence and motion planning to reduce the number of
 175 branching. They tried to present an automated approach to finding a sequence
 for extrusion. The authors assume the robot works in a fully observable and
 deterministic environment. More importantly, there is a need for an operator’s
 intervention to decompose the truss model in their work. Depending on the
 provided decomposition, the algorithm may fail to solve the sequence. In addi-
 180 tion, in their work, the sequence refers to the order of the end-effector’s feasible
 direction for each extrusion direction. In our problem, on the other hand, the
 sequence relates to placing rebars one after another to fabricate the whole cage.
 Besides, we aim at a fully automatic solution without requiring human operator
 involvement.

185 The authors in [17] presented an automated planning approach to jointly find
 a construction sequence and plan robot motion for additive manufacturing tasks.
 They define the construction sequence as ordering the components that are
 welded and glued together at their ends. In their study, only straight elements
 are taken into account. The difference between their work and ours is that
 190 rebars can be different shapes. In addition to that, they can be welded or tied

to each other from any point of their geometrical shape.

In another study, the authors in [18] presented a method based on cooperative assembly for fabrication. More specifically, two robots were implemented to fabricate a vault using identical bricks cooperatively. To find the construction
195 sequence, the stability of the bricks during the assembly process was considered while trying to maintain the global stability of the structure. The main idea behind their method is based on the principle that the weight of any added brick should be efficiently transferred to the structure.

4. Problem Statement

200 When it comes to automating the entire process for the fabrication of a rebar cage, given its digital twin as an input to the control unit and fully fabricated rebar cage as an expected output without human intervention, finding an installation order is crucial. Otherwise, the need for human operator involvement to plan and assign the tasks to each robot, or in other words, the sequence and
205 order each robot should take, can dramatically reduce the speed. Besides, it will no longer be possible for robots to work 24/7. It is also important to recall that every rebar cage is designed for a specific load, and thus, they are unique.

The general problem of determining a valid installation order for a rebar cage can be formulated as follows:

210 *Given the digital twin of a rebar cage and an automation system, find a valid order that describes in which sequence the bars can be installed by the adopted system, one after another, to fabricate the entire rebar cage.*

To solve the above problem, the following information should be taken into account:

- 215
- Rebar types,
 - Gripping points,
 - Welding points,
 - Welding tool approach angle,

- Collision detection between rebars, welding tool, robots, and gantry, and
- 220 • Current state of the rebar cage.

Eventually, given the above information, a path planner algorithm is required to take all these parameters as input arguments and plan a collision-free path for the adopted automation system to fabricate the entire cage, bar by bar. An installation order is called *valid* if and only if the adopted automation system
 225 can fabricate the cage following the determined sequence.

Our investigation shows that not all the parameters mentioned above are directly related, and thus, they can be considered and dealt with separately and independently. As a consequence, to simplify the above complex problem, and more importantly, to reduce and limit the search space where the solution
 230 exists, it can be divided into the two following simpler sub-problems:

A: *Given the digital twin of a rebar cage, find a feasible non-blocking collision-free sequence that allows the rebars to be placed in their specified position corresponding to their digital twin model. The rebars' path in this sub-problem is limited to the area near their final destination. The paths of the rebars are
 235 planned considering the gripping points and the grippers, welding points and welding tool, and including the welding tool approach angle. In other words, the collision between the rebars and the welding tool, as well as the grippers, shall be detected and avoided in the vicinity area of the final destination of the rebars rather than in the entire workspace of the gantry-robot system.*

B: *Given a candidate sequence determined in sub-problem "A", plan a collision-free path for the adopted automation system to fabricate the entire cage bar-by-bar, taking into account the collision between the rebars and the gantry-robots (the adopted automation system).*
 240

In other words, the problem of finding the rebar installation order is de-
 245 coupled into two sub-problems: (i) finding a way to deal with a large number of ordering possibilities (which is a combinatorial problem) and (ii) finding the robots' path.

The first sub-problem only concerns finding a candidate sequence of rebars

without worrying about any collision between the rebars and the gantry-robot
250 system or between the robots. The only concern in that regard is to avoid any
collision between the rebars, grippers, and welding tool in addition to making
sure that none of the previously placed rebars will act as a blocking and none-
avoidable obstacle (for example lapped or grouped bars) for placing the next
rebars. Finding non-avoidable obstacles implies that one of the rebars needs to
255 be placed first, thus limiting the number of candidate sequences. However, it
should be noted that this is because we are not looking for other installation
directions than the provided one. This will be further discussed in Section 7.

The final movement of the robots just before they place the rebars in their
final destination elaborates on the area where the collision between the rebars
260 and the tools should be detected and avoided. The neighboring areas' proximity
to the final destination depends on the second sub-problem and how the last
movement is defined.

On the other hand, the second sub-problem tries to find a collision-free path
from the rebars' initial position, i.e., the fixture where they are picked from,
265 to the final destination's neighboring area. This part deals with detecting and
avoiding the collision between the rebars, the gantry-robot system, and the
rebars and other already-installed rebars.

The installation order is validated if the path planner, i.e., the second sub-
problem, can find a collision-free path for the given sequence. This would mean
270 the adopted automation system can fabricate the cage following the determined
sequence, bar by bar.

We have previously addressed the second sub-problem in [1]. More specif-
ically, given a valid rebar sequence, we have developed an algorithm to plan a
constrained collision-free path for the gantry-robot system. In our presented
275 algorithm, we assumed that all three robots, including the middle one, which
holds the welding tool to weld the rebars together, follow a straight line near
their final destination. Both grippers move directly on a straight line to place
the rebars, and so does the welding tool to weld the rebars together. We use this
straight line as a constraint to the first sub-problem. Specifically, we assume in

280 this work that the gripping robots (and thus the grippers) place the rebars in
their final position following a vertical line from top to bottom while the welding
robot can follow a straight line in any direction. In our previously presented
work, we determined a valid sequence manually. This process of finding an order
requires a lot of work. If the path planner can't validate the obtained sequence,
285 a new one must be found.

To fully automate the rebar cage fabrication, i.e., given the digital twin of a
rebar cage as an input to the control unit, the output shall be a fully fabricated
rebar cage. It is necessary to get rid of the process of determining a valid rebar
sequence manually. It is, therefore, necessary to automatically determine such a
290 sequence. As a result, an algorithm that excludes as many infeasible sequences
as possible would save a lot of time—the fewer iterations, the less time spent,
and thus, the faster the overall process will be. In the next section, we present
an algorithmic approach based on heuristics that limits the number of candidate
installation orders.

295 5. Algorithmic Approach

This section presents an algorithmic method to limit the number of candidate
installation sequences. As discussed in Section 4, the planning algorithm in the
second sub-problem is designed to place rebars by moving them straight down.
While addressing the first sub-problem, we, therefore, assume that rebars are
300 placed vertically from top to bottom. Under such an assumption, we observe
that the horizontal parts (normally called legs) are more likely to block installing
other rebars. Bars with horizontal legs may be in the way when installing other
bars.

This algorithm is based on the rebars' horizontal legs placed in the same
305 horizontal plane; we denote this as a *layer*. Looking at one layer, we will see
that the bar legs are not colliding (please note that lapped bars are “in contact”
with each other and not colliding as explained above). Therefore, these bars
can be installed in an arbitrary order, and their sequence can be determined

straightforwardly, for example, from lower to higher “X” and “Y” respectively.

310 We call this heuristics-based method *Layering* (see Algorithm 1). The main contribution of the algorithm is the idea to define different layers of rebars, which limits and reduces the search space size and, thus, removes many impossible sequences while searching for a candidate solution for an installation order.

315 In this version of the algorithm, the rebars’ geometries are assumed to correspond to their theoretical geometries given by the digital twin. Furthermore, because of the simulation tool’s limitations, we assume that the welding points, gripping points, and approach angles are fed to the algorithm. This assumption doesn’t change the concept of the proposed algorithm and will be relaxed in the future when a more suitable simulation tool is found.

320 We denote all the states that the given cage can assume during fabrication as the state of the cage. One key observation is that one state can be part of several rebar sequences. If one state fails to yield a feasible solution, all the computations following that particular state can be excluded. This suggests the problem is well suited for a Depth-First-Search (DFS) [19] algorithm. The feasibility of a sequence indicates that the DFS should be guided to avoid any states that block the yet-to-be-placed rebars. In other words, the intention is to increase the likelihood of finding a feasible installation order. For that matter, we define heuristics based on our observations while fabricating the cage both manually and robotically.

330 The planning algorithm is designed to place rebars straight down, followed by an approach movement near their final destination. Looking at a cage from above, we observe that the horizontal rebars and rebars with horizontal legs¹ have a larger projected area than the vertical rebars and rebars with vertical legs². This can be interpreted as a constraining parameter that the horizontal bars and bars with horizontal legs in a partially assembled cage are more likely to block the installation of the yet-to-be-installed rebars. This is especially true

¹Parallel to the ground

²Perpendicular to the ground

Algorithm 1: Layering

input : DT = Digital Twin

output : R = Placement Sequence

```
Rebar  $\leftarrow$  RebarData(DT) ;      /* Determines rebars parameters:
ID, type, and position w.r.t the system coordinate frame
*/
[s, Z]  $\leftarrow$  Layers(Rebar) ;      /* s: Number of layers, Z: HLs
coordinates, each layer includes HLs with the same
z-coordinates */

for j  $\leftarrow$  1 to s do
    // find all the rebars with at least one Horizontal Leg
    in layer j
    tmp  $\leftarrow$  RebarsInEachLayer(Z(j));
    // sort rebars based on their "x-", "y-" and
    "z-"coordinates
    SortedRebars(j)  $\leftarrow$  SortRebars(tmp) ;    /* from left to right
    */
end

R  $\leftarrow$  SortedRebars
```

for horizontal bars/legs installed at the top of the cage before all the other rebars in the lower part are installed. The blocking and unavoidable obstacles can happen in two forms:

- 340 1. The next rebars cannot be placed.
2. The welding tool cannot reach the welding point.

This implies that because of the two above constraints, all the sequences following them are not feasible solutions. We use this observation to guide the search algorithm. For that purpose, we extract the geometrical information of
345 each rebar from the given digital twin. More specifically, we denote the height

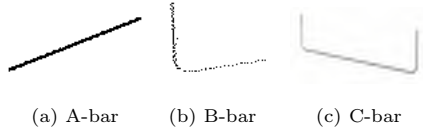


Figure 3: The rebar types that we consider in this paper.

of the top horizontal leg of the bars as the Z -coordinate of the rebar. In case the bar is a (horizontal) straight bar and parallel to the ground, i.e., it doesn't have any vertical leg as in Figure 3a, any point on the bar can represent the height of the bar. The height is defined with respect to the system coordinate
 350 frame, which can be arbitrarily placed anywhere on the floor. For simplicity and consistency, we assign it to one of the lower corners of the cage. We then initialize the search algorithm with a list of different rebar types in the given cage (as depicted in Figure 3). The algorithm tries to order the rebars based on their Z -coordinates where the order is from lower to higher Z -coordinate. The
 355 idea is to define the cage as horizontal layers ordered from the lower height to the higher. "Installation" of the rebars starts from the bottom layer to the top layer

It is worth noticing that we are currently interested in determining one valid solution. Therefore, the process stops when a valid solution is found, and the
 360 rest of the candidate solution(s) are not evaluated.

6. Results and Discussion

To test the algorithm, we used MATLAB and CoppeliaSim. In this paper, CoppeliaSim was mainly used for visualization. The digital twin of the cage was imported into CoppeliaSim as a combination of several STL files. The reason
 365 for using CoppeliaSim for visualization is that it is faster than MATLAB.

The input arguments for the algorithm are the welding points, gripping points, the rebar's positions and dimensions (which also define the final position of the rebar in the cage), the rebar type, and approach angles. It then creates different fabricating layers based on the information contained in the rebars;

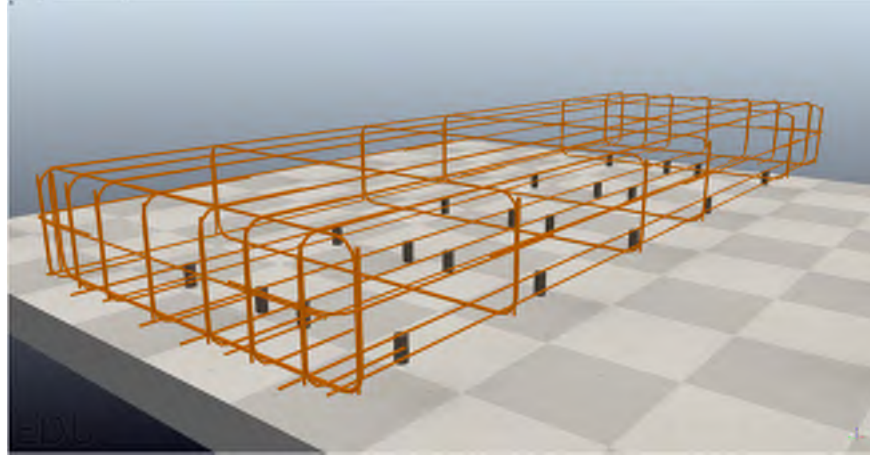


Figure 4: The study cage.

370 see Figure 5. For each rebar, the algorithm checks the collision between the grippers, the welding tool, and the rebars in the vicinity of the final position, as discussed above. Once all the rebars in all layers have been checked and found OK, a candidate sequence has been found. In the next step, the candidate sequence is fed to the path planning algorithm for validation.

375 The digital twin we used to verify the proposed algorithm, shown in Figure 4, is a simplified version of the real cage used for a structure in Stockholm, depicted in Figure 2.

The simulation of the fabrication of the rebar cage with automatic generation of the installation order can be seen via the provided link³

380 The proposed algorithm can find a candidate solution for the study cage without iterations. This, however, should not be mistaken that the proposed algorithm can find a candidate installation order for all cages. There might be cases where the iterations are inevitable. More importantly, there are cages that the algorithm may even fail to find a candidate solution. More heuristics and
385 additions to the algorithm may be necessary to address more complicated cages with more different rebar types than the one presented in this paper. It should

³<https://www.idt.mdh.se/~aps01/research/robotics/2023-InstallationOrder.mp4>

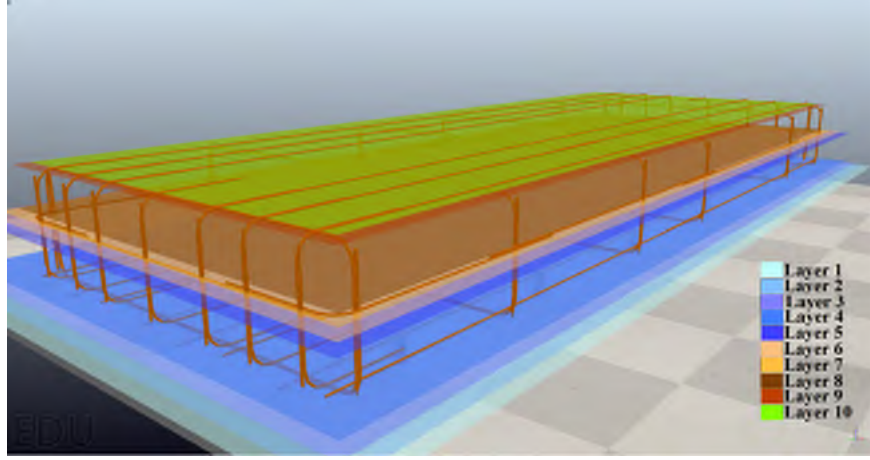


Figure 5: The study cage with its 10 different layers.

also be noted that the input data fed to the algorithm must also be generated automatically.

7. Conclusions and Future Work

390 The fact that rebar cages are often unique and designed to carry a certain load specifically makes their fabrication a challenging problem for automated construction. This application would require an automation system that is flexible enough to adapt production to such one-of-a-kind cage models easily.

In this context, when automating the construction of rebar cages, a central challenge to solve is to generate, given a design of a rebar cage, a valid
395 installation order which the robot(s) can follow to assemble the rebar cage automatically.

Our observations show that the problem of fully automatic fabrication can be split into two sub-problems, which help find a solution. In addition to that,
400 heuristics can help reduce the number of iterations by removing impossible sequences. There exist cages that require a more developed version of our algorithm to find an installation order, i.e., the presented solution may only apply to some types of rebar cages but work well, given the presented assumptions

and limitations.

405 Future work should be devoted to automatically finding an approach angle for the tools, finding ways to store information regarding the cage, and study of other cages with other rebar types, which may require developed heuristics.

References

- [1] M. Momeni, J. Relefors, A. Khatry, L. Pettersson, A. Papadopoulos,
410 T. Nolte, Automated fabrication of reinforcement cages using a robotized production cell, *Automation in Construction* 133 (2022) 103990. doi:10.1016/j.autcon.2021.103990.
- [2] Flexible automation – the future of reinforcement installation.
URL <https://www.youtube.com/watch?v=y0fLH-srv1M>
- 415 [3] M. Grieves, J. Vickers, Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems, Springer International Publishing, Cham, 2017, pp. 85–113. doi:10.1007/978-3-319-38756-7_4. URL https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4
- [4] CDBB, Centre for Digital Built Britain, The approach to delivering a national digital twin for the united kingdom.
420 URL https://www.cdbb.cam.ac.uk/files/approach_summaryreport_final.pdf
- [5] D. McDermott, M. Ghallab, A. E. Howe, C. A. Knoblock, A. Ram, M. M. Veloso, D. S. Weld, D. E. Wilkins, Pddl-the planning domain definition
425 language, 1998.
- [6] B. K. Natarajan, On planning assemblies, in: 4th ACM Symp. on Computational Geometry, 1988, p. 299–308.
- [7] L. E. Kavraci, M. N. Kolountzakis, Partitioning a planar assembly into two connected parts is np-complete, *Information Processing Letters* 55 (3)
430 (1995) 159–165. doi:10.1016/0020-0190(95)00083-0.

- [8] D. F. Baldwin, T. E. Abell, M.-C. M. Lui, T. L. D. Fazio, D. E. Whitney, An integrated computer aid for generating and evaluating assembly sequences for mechanical products, *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 7 (1) (1991) 78–94. doi:10.1109/70.68072.
- 435 [9] L. Homem de Mello, A. Sanderson, A correct and complete algorithm for the generation of mechanical assembly sequences, *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 7 (2) (1991) 228–240. doi:10.1109/70.75905.
- [10] A. Delchambre, P. Gaspart, Klap: an industrial prototype of knowledge-based assembly planner, in: *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA92)*, 1992, pp. 2404–2411 vol.3. doi:10.1109/ROBOT.1992.220104.
- 440 [11] T. Murayama, F. Oba, Disassembly/assembly path search reusing solutions, in: *1997 IEEE 6th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation Proceedings, EFTA '97*, 1997, pp. 183–188. doi:10.1109/ETFA.1997.616266.
- 445 [12] U. Thomas, R. Iser, A new probabilistic path planning algorithm for (dis)assembly tasks, in: *ISR 2010 (41st International Symposium on Robotics) and ROBOTIK 2010 (6th German Conference on Robotics)*, 2010, pp. 1–6.
- 450 [13] Y. Cao, H. Liu, C. Song, H. Wu, D. Wang, H. Lin, A method of equipment disassembly path planning based on directed constraint graph disassembly sequence, in: *2020 International Conference on Computer Engineering and Intelligent Control (ICCEIC)*, 2020, pp. 32–35. doi:10.1109/ICCEIC51584.2020.00014.
- 455 [14] S. Sundaram, I. Remmler, N. Amato, Disassembly sequencing using a motion planning approach, in: *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2001, p. 1475–1480. doi:10.1109/ROBOT.2001.932818.

- [15] D. Halperin, J.-C. Latombe, R. H. Wilson, A general framework for assembly planning: The motion space approach, *Algorithmica* 26 (2000) pp. 577–601. doi:10.1007/s004539910025.
- [16] Y. Huang, C. Garrett, C. Mueller, Automated sequence and motion planning for robotic spatial extrusion of 3D trusses, *Contr. Rob.* 2 (2018) 15–39.
- [17] Y. Huang, C. Garrett, I. Ting, S. Parascho, C. Mueller, Robotic additive construction of bar structures: unified sequence and motion planning, *Contr. Rob.* 5 (2021) 115–130.
- [18] S. Parascho, I. X. Han, S. Walker, A. Beghini, E. P. G. Bruun, S. Adriaenssens, Robotic vault: a cooperative robotic assembly method for brick vault construction, *Contr. Rob.* 4 (2020) 117–126.
- [19] S. Russell, P. Norvig, *Artificial intelligence: a modern approach*, Pearson Education Limited, 2016.



Construction Automation – Assessment of State of the Art and Future Possibilities

Master thesis work

Advanced level, 30 credits

Product- and process development

Patrik Folkesson
Robert Lönnroos

Commissioned by: Skanska
Tutor (company): Lars Pettersson
Tutor (university): Jessica Bruch
Examiner: Antti Salonen

ABSTRACT

The world of automation has grown rapidly for the last four decades and it is driven by higher demands from users, technology development and maturity of technologies of industrial processes. Companies all over the world have automated their manufacturing processes which have led to billions of dollars in productivity and quality improvements. In the construction industry innovation transpires extremely slowly and a reluctance to implement new strategies and a low research and development budget also contribute to the slow innovation rate. Because of this, technical innovations such as automation solutions are uncommon in the construction industry. Methods and concepts from the manufacturing industry, such as lean principles and mass customization, have for some time tried to be implemented the construction industry to reach higher productivity. However, despite those efforts, automation solutions are not yet commonplace on the average construction site.

The purpose of this thesis is to investigate existing and emerging automation solutions that could be used to automate on-site construction operations with the use of digital technologies. Empirical and theoretical studies were conducted. A literature study was conducted to gain knowledge regarding the construction industry and its digitalization and general level of automation. This was then complemented with an interview study, where Skanska AB's Technical Specialist was one of the interviewees, in addition to being the company's mentor for this thesis. Skanska served as an example of a representative construction company since it is one of the largest construction companies in the world. To widen the data collection, the interview study included several relevant companies where their representatives were interviewed regarding their own state of digitalization and automation.

For guiding the purpose of the thesis, three research questions were formulated. The research for answering these questions led to the resulting findings regarding what is possible to automate on the construction site, what the benefits could be from implementing such solutions and what the challenges are which needs to be overcome.

The results of these studies show that the construction industry is facing challenges regarding the implementation of automation solutions. Examples of this are the lack of data in general, safety concerns and project planning operations. The currently existing industrial robots, for example, are generally heavy with low lifting capacity to weight ratio which is not much of a problem in a manufacturing setting, but it makes for an imperfect fit in the construction industry, since movability and high lifting capacity is of interest for such implementations. This thesis provides knowledge of available technologies that can be used for implementing automation at the construction site as well as what benefits can be expected from successful implementations of such solutions, such as higher productivity, increased profitability and increased safety for both equipment and personnel.

Keywords: *Construction Automation, Building Information Modelling (BIM), Robotics*

SAMMANFATTNING

Automationsvärlden har växt kraftigt under de senaste fyra årtiondena och drivs av ökande krav från kunder, teknologiska framsteg och mognande av teknologier för industriella processer. Företag över hela världen har automatiserat sina tillverkningsprocesser, vilket har lett till miljarder dollar i produktivitets- och kvalitetsförbättringar. Innovationer förekommer extremt sällan i byggbranschen. Detta kan förorsakas av att det finns ett motstånd mot att implementera nya strategier samt att budgeteringen för forskning och utveckling är låg, generellt sett. Byggbranschen har tidigare försökt att implementera metoder och koncept från tillverkningsindustrin, som till exempel Lean tillverkning och mass-anpassning, för att nå högre produktivitet. Trots dessa försök är automationslösningar ännu inte vanliga på den genomsnittliga byggarbetsplatsen.

Syftet med denna studie är att upptäcka befintliga och kommande automationslösningar som kan användas för att automatisera uppgifter på byggarbetsplatser, genom användandet av digital teknologi. För denna studie gjordes empiriska och teoretiska studier. En litteraturstudie genomfördes för att samla kunskap om byggindustrin och dennes digitalisering och övergripande automationsnivå. Detta kompletterades sedan med en intervjustudie där Skanska AB:s tekniska specialist var en av deltagarna, utöver dennes roll som handledare till denna studie. Skanska som företag var en viktig referens till byggbranschen eftersom att deras position på marknaden gör dem till en väsentlig representation av ett typiskt byggföretag. För att ge bredd åt datainsamlingen inkluderades fler relevanta företag i intervjustudien där deras representanter blev intervjuade angående deras företags digitalisering och automation.

För att leda syftet med denna studie formulerades tre forskningsfrågor. Forskningen för att svara på dessa frågor ledde till de resulterande upptäckterna om vad som är möjligt att automatisera på en byggarbetsplats, vilka fördelar det innebär samt vilka utmaningar som behöver övervinnas.

Resultaten från dessa studier visar att byggindustrin möter utmaningar gällande implementeringen av automationslösningar. Till exempel industrirobotar, som idag är bland de mest lovande hjälpmedlen för automationslösningar, används för flertalet nya sådana lösningar. Trots deras användning i byggindustrin visar det sig att de inte är helt optimala för användning i byggindustrin på grund av att de generellt sett väger mycket i förhållande till hur mycket de kan lyfta. Detta är inte ett problem i tillverkningsindustrin, men gör robotarna opassande för byggindustrin därför att det där krävs att robotarna ska vara lätta att flytta på och ha en hög lyftkapacitet. Denna studie ger kunskap om tillgänglig teknologi som kan användas för att implementera automationslösningar samt de fördelar som dessa lösningar kan ge, såsom ökad produktivitet, ökad lönsamhet och bättre säkerhet för både utrustning och personal.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors want to thank Skanska and Robotdalen for the opportunity to look into automation possibilities in the construction industry.

A special thanks to Lars Pettersson at Skanska for his guidance, knowledge and innovative mindset that served as an inspiration to us.

The authors also want to express gratitude to Jessica Bruch at Mälardalen University for her support and guidance.

Thanks to ABB and BIM Alliance for inviting us to their conferences and the companies that were a part of the interview study.

Contents

1	INTRODUCTION.....	1
1.1	BACKGROUND	1
1.2	PROBLEM FORMULATION	3
1.3	PURPOSE AND RESEARCH QUESTIONS	4
1.4	SCOPE.....	4
2	RESEARCH METHODOLOGY	5
2.1	RESEARCH DESIGN	5
2.2	RESEARCH PROCESS	6
2.3	DATA COLLECTION	7
2.3.1	Global Analysis.....	7
2.3.2	Literature Study	7
2.3.3	Interview Study.....	8
2.3.4	Conferences	10
2.4	VISUALIZATION	10
2.5	DATA ANALYSIS	10
2.6	VALIDITY AND RELIABILITY	11
2.6.1	Validity	11
2.6.2	Reliability	12
3	THEORETICAL FRAMEWORK	13
3.1	INDUSTRIAL AUTOMATION.....	13
3.1.1	Automation Benefits	14
3.1.2	Automation Challenges.....	14
3.2	CONSTRUCTION INDUSTRY	15
3.2.1	Automation in Construction.....	16
3.3	EXISTING TECHNOLOGIES	17
3.3.1	Artificial Intelligence.....	17
3.3.2	Additive Manufacturing.....	17
3.3.3	Drones	18
3.3.4	Internet of Things (IoT)	18
3.3.5	BIM Building Information Modelling/Management (BIM)	20
4	EMPIRICAL FINDINGS	23
4.1	INTRODUCTION OF SKANSKA.....	23
4.1.1	Skanska's Automation State	23
4.2	GLOBAL ANALYSIS - STATE-OF-THE-ART IMPLEMENTATIONS.....	25
4.2.1	State-of-the-art summary	27
4.3	INDUSTRIAL ROBOTS	27
4.4	WORK TASKS REQUIRED FOR BUILDING SANDWICH WALLS	28
4.5	INTERVIEW STUDY	28
4.5.1	Unibap.....	28
4.5.2	ABB Robotics	29
4.5.3	Trimble Solutions Sweden AB (BIM Expertise)	29
4.5.4	Company A (Designs buildings with BIM)	29
4.5.5	Build-r.....	30
4.5.6	FANUC.....	30
4.5.7	byBrick Interface AB.....	31

4.5.8	Smederna AB.....	31
4.5.9	Company B (Wall prefabricator)	32
4.5.10	Company C (Prefabricator of villas)	32
4.5.11	Summary of the results from the interview study	33
4.6	CONFERENCES.....	34
4.6.1	Utblick med BIM Alliance 2018.....	34
4.6.2	ABB Automation Scandinavia 2018.....	35
5	ANALYSIS	37
5.1	RESEARCH QUESTION 1 – WHAT IS POSSIBLE TO AUTOMATE ON THE CONSTRUCTION SITE WITH TODAY’S TECHNOLOGIES?.....	37
5.2	RESEARCH QUESTION 2 – WHAT ARE THE BENEFITS OF AUTOMATION ON THE CONSTRUCTION SITE? ..	39
5.3	RESEARCH QUESTION 3 – WHAT ARE THE CHALLENGES FOR IMPLEMENTING AUTOMATION ON THE CONSTRUCTION SITE?	40
5.4	AUTOMATION CONCEPT CASE.....	41
5.4.1	Requirements	41
5.4.2	Industrial robot.....	41
5.4.3	Machine vision.....	41
5.4.4	BIM.....	42
5.4.5	Mobile Platform	42
5.4.6	Execution	42
5.4.7	Solidworks Layout	43
5.4.8	Safety	43
5.4.9	Automation concept regarding the RQs.....	43
6	DISCUSSION AND CONCLUSIONS	45
7	REFERENCES.....	48
7.1	GLOBAL ANALYSIS REFERENCES	52
	APPENDIX – ADDITIONAL RENDITIONS OF CONCEPT CASE.....	55

ABBREVIATIONS

AI – Artificial Intelligence

BIM – Building Information Modeling (or Building Information Management)

CA – Construction Automation

CR – Construction Robot

HRC – Human Robot Collaboration

IoT – Internet of Things

IIoT – Industrial Internet of Things

UAV – Unmanned Aerial Vehicle

UGV – Unmanned Ground Vehicle

1 INTRODUCTION

In this chapter, differences between the construction and manufacturing industry is described to give light to some important aspects that sets them apart, such as general productivity and digitalization. This is then followed by the problem formulation, which was the basis for this thesis. Thereafter, the research questions are presented. Finally, the scope subchapter describes what is included into this research.

1.1 Background

The manufacturing industries and construction industry had similar productivity in the 1990s, but since then the manufacturing industry's productivity have increased and the construction industry's productivity have decreased (Bock, 2015). Reasons for the increase of productivity in manufacturing could be due to the benefits from automation, as identified by Frohm et al. (2006), benefits from automation in manufacturing are efficiency improvements, cost reductions and enhanced competitiveness and productivity.

The world of automation has grown rapidly for the last four decades and it is driven by higher demands from users, technology development and maturity of technologies of industrial processes (Mehta & Reddy, 2015). It's a balance of quality, productivity, flexibility and cost that permits companies to use automation as a strategic advantage (ibid.). Fully automated processes yield excellent results while in semi-automated and manual processes the results will vary, due to the inconsistencies of human nature (Sharma, 2011). Digital technology provides data for automated manufacturing technologies (Eastman et al., 2008). According to Mehta & Reddy (2015), automation benefits from interconnected control systems and information throughout a factory so that the control of operations can be fully integrated.

The construction industry is behind other industries in digitalization and automation (Oesterreich & Teuteberg, 2016). Digitalization is an important enabler for automation. According to Richards (1994), computer models, containing all the necessary information to produce information databases for usage in the following construction stages, are needed for automation and robotics to become more prevalent in the construction industry. Furthermore, the construction industry is acknowledged to be lagging behind many other industries in terms of productivity improvements (Fulford & Standing, 2014). García De Soto et al. (2018) states that the reasons for the decrease of productivity, globally, in the construction industry are several, such as resistance to change which stems from the fact that the construction sector is very traditional. Moreover, the construction industry is suffering from poor collaboration, low data exchange and high levels of turnover making implementations of new methods challenging. Furthermore, innovation transpires extremely slowly in the construction industry (Bock 2015; Bogue 2018; Wu et al. 2016). Wu et al. (2016) adds that the construction industry is seen as a low-tech industry. The reasons behind the slow innovation rate can be because of long life-cycle, the products having high variations and complexity, diversity of dimensions and a fixed site of the construction (Bock, 2015). A reluctance to implement new strategies and a low research and development budget also contribute to the slow innovation rate (Bock, 2015). The worldwide construction industry has achieved little in technological advancement (Smith & Tardif, 2009).

Although the development and use of automation in construction is low compared to other sectors, robots in construction is not entirely new. Already in the late 1980s some robots were in use for demolishing concrete, drilling tunnels, grinding concrete, carrying loads and cleaning floors (Rahm, 1988). According to Fulford & Standing, (2014) there are great potential for productivity improvements in the construction industry and collaboration is one aspect that can improve productivity.

Seeing the benefits from using automation in the manufacturing industry, one can easily begin thinking about what automation could implicate in the construction industry. There could be much to gain from such implementations, as Vähä et al. (2013) report that automation in construction should lead to higher productivity, performance, safety, quality and value. Bouge (2018) states that the use of construction automation (CA) has the potential to return substantial operational, environmental and economic benefits. Some have seen these potential benefits and, according to Bonev et al. (2015), methods and concepts from the automotive industry have for some time tried to be implemented into research in construction to reach higher productivity.

In a complex and labor intense area such as the construction sector, the need for automating time consuming, hazardous and repetitive tasks has been in increasing demand (Panda et al., 2017). Workers with the right education or exceptional skills have never been more important than today since they can create value from the use of technology (Autor, 2015).

Regarding the safety aspects of the construction sites, it is common for construction workers to suffer from injuries in the musculoskeletal system that affects movement in the human body which is commonly known as musculoskeletal disorders (MSDs) (Dzeng et al., 2017). MSDs are often caused by stressed motion that are cumulative and repeated or lifting heavy equipment suddenly, resulting in fatigue (Dzeng et al., 2017). The construction industry is in many countries one of the most dangerous industry for workers (Poh et al., 2018). The construction industry exposes workers to a dangerous and harsh working environment and have high occurrences regarding injuries and deaths compared to all other sectors (Barker et al., 2004; Zou et al., 2017). 65,000 construction workers were seriously injured and 35 with fatal injuries were reported in 2014-2015 in the UK (Health and Safety Executive (HSE), 2016). There is a substantial financial cost along with accidents in the construction sector which was reported to be £0.9 billion in 2013-2014 (Health and Safety Executive (HSE), 2016). Sharma (2011) states that, among other benefits, automation increases safety for both equipment and personnel.

Robots can work around the clock without a break and can be used for repetitive and heavy lifting tasks which increases ergonomics for workers, according to Usmanov et al. (2017), leaving more suitable work tasks for the construction workers. Robot systems have become more advanced which makes them able to work in unstructured environments and in several diverse fields (Bock, 2015). As such, these safety aspects could be improved by the use of automation, where machines can perform the heavy lifting and strenuous work tasks.

Conventional construction methods may have reached its limits according to some indicators such as performance, defect rates and growth. To conquer these limits, the construction industry could implement consequent automation, comparable to what other manufacturing and service industries has already done successfully (Bock, 2015). Automation in construction is currently in the beginning stages and can soon enter the

growth phase with implementations on a larger scale (Bock, 2015). Automation in construction can be on-site, in logistics and off-site where parts can be prefabricated (Vähä et al., 2013). A substantial part of the construction activities can be performed off-site due to advancement in Information and Communication Technology (ICT) (Vähä et al., 2013). The automation solutions surveyed for this thesis focused on the on-site fragment of CA.

Computers are continuously becoming more powerful and they are acquiring skills that can automate simple work tasks which reduces the need for workers with ordinary abilities and skills (Autor, 2015). Automation is typically substituted for labor, but it is also a complement that can lead to a higher demand for labor which can increase profit and productivity (Autor, 2015). Previously in construction, powered tools and earth-moving equipment has displaced manual labor (Autor, 2015).

1.2 Problem Formulation

A construction site is highly dynamic due to rapid changes and many moving parts (Papaioannou et al., 2017). Common problems on-site are poor communication between project phases and actors, lack of information sharing, uncertainties, reliable deliveries and material flows (Thunberg et al., 2017; Dupont et al., 2017). The construction industry has also struggled with high material wastage, costs, flat productivity, safety and shortage of labor (Bouge, 2018).

Construction projects are unique in many ways, with varying build dimensions, works tasks and also with differing project budgets. This means that automation solutions in the construction industry is challenging to implement. A major challenge with automation implementations in the construction industry is that it is an ever-changing environment and few work tasks are identically performed at each occasion (Vähä et al., 2013). One may wonder why the construction site still does not have a high level of automation, even though research in automation in construction began several decades ago.

The manufacturing industry's counterpart which in some ways resembles the construction industry's way of working is the low volume, high variation manufacturing, this becomes clear when comparing the two. What characterizes low volume high variation manufacturing production is, according to Jina et al., (1997), that the production volumes are between 20-500 units per year and the production planning often includes the whole make-to-order planning. Jina et al., (1997) also states that in a low volume high variation manufacturing, the products which are manufactured are of high complexity with a high amount of technology, parts and components and its production systems are often characterized by a high level of flexibility. An example of this type of production is reported by Webb, et al. (2015), where they state that, compared to other industry sectors such as pharmaceutical and automotive, the aerospace manufacturing makes relatively little use of automation, the product volumes are usually small, and its product parts variation is very high. Therefore, it can be beneficial to see what challenges that particular manufacturing sector is facing as well as how they have overcome past hurdles.

With these current problematic characteristics of the general construction industry where there is a lack of data, deeply rooted traditions regarding the way of working, slow innovation rate and a resistance to change as well as complex products and processes, the implementation of automation are undeniably challenging.

1.3 Purpose and Research Questions

The purpose of this report is to investigate existing and emerging automation solutions that could be used to automate on-site construction operations with the use of digital technologies. In order to guide the research and focus the research objective, three research questions were formulated as follows:

RQ1: What is possible to automate on the construction site with existing technologies?

RQ2: What are the benefits of automation on the construction site?

RQ3: What are the challenges for implementing automation on the construction site?

The goal is to find suitable and existing technologies that can be used and combined for implementation on-site in the construction industries.

1.4 Scope

This thesis focuses on technologies which can be relevant in the implementation of automation in the construction industry. The authors set out to find existing, or emerging, automated solutions suitable for the construction site. However, some of these solutions could also be of interest in other areas in the construction industries, an example is Building Information Modelling (BIM), which can be used in the project planning stages of construction. Theories for this research was focusing on digitalization and automation in the construction industry, as well as industrial robotics and state of the art technology related to automation.

The interview study for this thesis included information from Skanska, which focused on construction site operations. On-site construction operations imply physically oriented tasks such as handling of material, mounting, or assembling, of building material and landscaping. The companies for the interview study were chosen and included for their expertise, available technology and related business sectors.

Construction project design automations are not included in this study. Construction prefabrication is included since similarities can be found between prefabrication processes and on-site processes. Naturally, this thesis only covers technology and automation solutions available at the time of this research. This report will not address, in detail, how much labor hours will be reduced from certain automation implementations. This means that the results from the research will not report comparisons between automation implementations and its traditional counterpart in exact labor hours. Furthermore, an example case of automation implementation is suggested and explored in this thesis, where gathered information regarding technology of sensors, robotics, artificial intelligence, prefabrication and construction will be used as support for this suggested automation implementation. This example case addresses the on-site construction of so called sandwich walls, consisting of a polystyrene core, rebar and concrete.

Other business sectors may also benefit from this report if their work tasks are labor intense and dynamic, meaning that their tasks are physically demanding and the work environment and/or the task execution itself is changing for every iteration. These other business sectors would most likely benefit most from having similar preconditions as the construction industry, such as high flexibility, low volume and a high variety of products.

2 RESEARCH METHODOLOGY

According to Dadhe (2016) the research methodology is what bridges the gap between problem and solution. The methods for doing so in this thesis is covered in this chapter, where it presents an overview of the methods used in order to find solutions to the three research questions previously stated as basis for this thesis. A description of how the results of the research was interpreted is also included in this chapter, as well as a discussion of the validity and reliability of the research.

2.1 Research Design

The research methods utilized for this thesis were both theoretical and empirical. Gagnon (2010) explains that if the researchers have some preliminary ideas and conceptions of the research questions, then the research can be considered exploratory in nature, whereas it would instead be considered raw empirical if no such ideas regarding the research questions exists prior to the research. The research purpose was exploratory where the thesis sought to understand a problem or phenomenon. The research began with a literature study to gain knowledge about the construction industry and its state of automation. A global analysis was also performed to find relevant companies and technologies which were state of the art regarding construction automation. Saunders et al. (2016) states that interviews are common practice for answering questions of an exploratory nature, where the research questions often starts with “What” or “How”, which fits the research questions for this thesis. Therefore, an interview study was performed as a complement to the literature study, because it was deemed a suitable strategy for answering the research questions formulated for this thesis, where the research would benefit from multiple sources of information. As for the interview as a method for gathering data, Gagnon (2010) states that it is among the most important sources of information. In the interview study, Skanska AB’s Technical Specialist was one of the interviewees, in addition to being the company’s mentor for this thesis. Gagnon (2010) advises researchers to not become too dependent on the information provided by the interviewees, which is why the interview study in this research is a complement to the literature study.

The research for this thesis was done in close reconciliation with Skanska, since the Technical Specialist was experienced and had expertise regarding the construction industry. This was a valuable asset to the authors which helped to keep the research relevant and gave validation to many of the research findings. Skanska as a company was also an important reference to the construction industry since their position on the market makes them a substantial representation of a rather typical construction company. To widen the data collection, the interview study included several other relevant companies where their representatives were interviewed regarding their own state of digitalization and automation. From the data conceived an automation case concept was modelled in the computer program Solidworks 2017-18. This was to illustrate a possible case of near-future on-site CA, using already existing technology. In the final stages of the thesis, two conferences were attended, *Utblick med BIM Alliance 2018* and *Automation Scandinavia 2018*. The conferences provided valuable data regarding the construction industry’s state of digitalization and automation. However, since these conferences occurred late in the thesis time span, these conferences served most to validate already gathered data.

2.2 Research Process

The research began with the literature search from which knowledge was gained regarding the construction industry and its overall level of automation. This was essential for defining the problem and assisted in generating the three research questions for this thesis. Performing a global analysis, a broad sweep of Google and YouTube was also carried out. Further information from these companies were then found through the respective companies' web pages if such existed. In this global analysis several interesting companies were found and provided insight as to what kind of automation implementations are currently being developed. In order to gather knowledge regarding how a major construction company sees the prospects of CA, an interview study was conducted where Skanska AB was the main interviewee of the study. As a complement to the literature study, an interview study was performed where information was gathered from multiple companies, which were of interest for the authors of this thesis.

Towards the end of the research period two conferences were attended, one of which was about digitalization in the construction industry, where BIM and sustainability were central. The other one was about automation and digitalization in the manufacturing industry, where the focal point was about improving already established automation and aiming towards increased equipment connectivity and efficiency, these conferences brought validity to the previously found data in this research.

Figure 1 illustrates an overview of the data collection methods and their timeframes in relation to each other and the data collection period as a whole. The figure includes the analysis and report writing to show that the literature study was continued throughout the entire length of the thesis time span.



Figure 1: Data Collection Process

2.3 Data Collection

Data for the research was primarily gathered from the literature study, global analysis and the interview study, with two conferences attendances as complement to the aforementioned studies. These are explained in more detail in the following subsections. The results from these are presented in chapter 4.

2.3.1 Global Analysis

This analysis was conducted by utilizing Google's and Youtube's search engines. Search words used in this search were construction automation, *construction automation and robotics* and *robotic construction*.

The inclusion criteria were that the automation solution had to be already established or promising enough for it to be a feasible solution for the near future. With the near future being within the next ten years. Results from this search can be found in section 4.1.

2.3.2 Literature Study

The literature study provided great knowledge on the construction industry's general operation routines and common challenges, such as safety issues and low productivity. This also provided a background of the history of construction and its overall level of digitalization and automation. Obstacles hindering automation solutions on the construction site was shortly made clear since connections could be found between early articles and articles written in the modern era, showing that some issues are deep rooted and require extensive effort to overcome. Fortunately, the literature study also exposed technologies and advanced automation solutions made to combat these issues.

In the literature study, the databases *Emerald Insight* and *ScienceDirect* served as the main sources of articles and conference proceedings. The international journal *Automation in Construction*, which provided many helpful articles which inspired further research. Another valuable source of literature was the proceedings of the 34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2017), which was the latest issue of ISARC at the time of this research and its contents could therefore be considered state-of-the-art. However, this issue's content also inspired further research elsewhere, such as the 16th issue of ISARC.

Keywords for the literature search can be found in *Table 1*. Resulting papers ranged from a time span from 1988 to 2018, where the majority of the papers were between 2010 and 2018 since the more recent papers where of most interest for discovering state-of-the-art implementations of CA and technology. Through the snowball system, commonly used concepts and terminology was discovered. The inclusion criteria for the literature was that it had to be relevant to the topic of this research and it must be peer reviewed. Both qualitative and quantitative studies was deemed ok to include.

Table 1: Literature search key words and hits

Keywords	Database hits – Emerald Insight	Database hits - ScienceDirect
“Automation in Construction”	27	3,822
“Construction Robotics”	1850	256
“High Variation” “Low Volume Production”	24304	6
BIM for Construction	580	3,555
“Machine learning” “construction industry”	27	255
“Artificial intelligence” “manufacturing industry”	177	1666

2.3.3 Interview Study

The interview study consisted mainly of weekly Skype meetings, of about one hour each, with the authors’ mentor, Skanska’s Lars Pettersson, technical specialist for the section Large Projects. During these meetings, the key topic was to discuss how Skanska works with automation in their construction projects and to see what research and development efforts are being made to advance digitalization and automation in the construction industry. Furthermore, in these meetings knowledge of emerging technologies and companies were shared to give light to some of the known state-of-the-art at that particular time and to promote further research. Additional interviews were held with representatives from different companies. The purpose of doing so was to gain insight into the construction industry, important applicable technology and to see what the companies’ views and state were, regarding digitalization, automation and its challenges and benefits. The interviews were open-ended with a general theme of discussion which were guided by the thesis authors. The reason for doing so was because the different companies, which was partaking in the interviews, had differing key business concepts, which was hypothesized to influence the interviews. This means that a standard questionnaire, typical for structured interviews, had undoubtedly been very difficult to establish, perhaps leading to unfruitful interviews where the interviewees would have trouble answering most of the questions. This open-ended interview structure meant that the data retrieved from each interview was mostly specific to the companies of the interviewees. However, since the topics of the interviews were similar, general trends and discussion outcomes were still easily recognizable. The authors took caution to not immediately generalize the data from the interviews, but instead sought to the other data collection methods to support the interview findings.

The companies and the title of the interviewees can be seen in *Table 2*. They were contacted based on their technologies and expertise which added knowledge into this report. Some of the companies chose to remain anonymous and are referred to as *Company A, B* etc. Note that Unibap AB was interviewed twice, but with a different company representative. All interviews were conducted for at least an hour, but no longer than one and a half hour. The

main interview topics were digitalization and automation benefits and challenges, where the focus was on the interviewed companies' own states and prospects regarding digitalization and automation. The interviews took place at an office at the respective company except in two cases. The interview with FANUC Nordic AB was held at Mälardalen University and Skanska Rental responded to questions via email correspondence.

The intent was to conduct interviews with at least two companies that have similar businesses. However, this turned out to be challenging because of lack of responses and complications from geological locations.

Table 2: Overview of interviewed companies, their main market role and interviewee titles

Company	Main Market Role	Title of interviewee	Date
Unipab AB	Supplier of technical solutions, for use with industrial robotics	Development Manager	2018-03-01
ABB Robotics	Supplier of industrial robotics	Sales Manager	2018-03-02
Trimble Solutions Sweden AB	Supplier of advanced software for the construction industry, as well as total stations	Sales Manager	2018-03-06
Company A	Construction planning contracting (BIM)	Structural Engineer	2018-03-07
byBrick Interface AB	Supplier of technical solutions such as cross reality experiences (e.g. VR and AR)	Team Leader	2018-03-13
FANUC Nordic AB	Supplier of industrial robotics	Technical Director	2018-03-14
Company B	Prefabrication of concrete walls, plus transport and mounting of those	Production Engineer	2018-03-23
Smederna Sverige AB	Project planning, drawing, manufacturing and installation of steel constructions	Calculation/Sales Manager	2018-03-27
Build-r AB	Specialized drywall contractor, currently developing robotic solutions for this	CEO	2018-04-04
Skanska Hus	Developing and constructing houses	Project Manager	2018-04-06
Skanska Rental	Rental of construction equipment	Regional Manager, central Sweden	2018-04-12
Company C	Prefabrication of villas	Production Manager	2018-04-12
Unibap AB	Supplier of technical solutions, for use with industrial robotics	Senior Sales Director	2018-04-12

In relation to the interview study, four study visits were made. The first visit was to a company that makes prefabricated walls, the second was to a company that builds villas in modules in a factory, the third visit where to Smederna that manufacture and build steel structures and the final visit was to Munktell Science Park to observe a prototype of an automated rebar station that was developed by Skanska and Robotdalen. During the visits, qualitative interviews were held with the worksite supervisors and observations was made. This served as a means to provide further insight to a physical construction case which was helpful to the thesis and it demonstrated the validity of the research.

2.3.4 Conferences

Two conferences were attended. One was held by BIM Alliance Sweden through Smart Built Environment and the other by ABB, called *Automation Scandinavia 2018*. Smart Built Environment is a strategic innovation program that is financed by VINNOVA, Energimyndigheten and Formas, there are also 50 companies behind the program. BIM Alliance is a nonprofit association that is sector driven which is working with the help of BIM for a better urban development. The topics at the conference was mainly about the digitalization in the construction industry, but also about the development of BIM, artificial intelligence, sustainability and how the industry can learn from those that are ahead. The speakers in the conference was from the construction industry, Linköping University, Jönköping University, Formas and several other companies.

The ABB conference was about how companies can convert digital technology to quality, productivity and availability. The topics were several and it was not possible to attend all speakers since they were divided into several rooms. Those topics that were attended was about digital transformation in reality, digitalization in reality, and optimizing your plant. The speakers were from ABB, energy sector companies, other company representatives and a professor from KTH, the Royal Institute of Technology. During the conferences, the authors took notes and recorded both videos and audio clips for later review and analysis.

2.4 Visualization

Utilizing the gained knowledge from the interview study and literature study a visualization was made using Solidworks 2017-18. Solidworks is a program commonly used for designing and modelling products. The purpose of this visualization was to illustrate a potential future case of implemented CA, to help answer **RQ1**.

The visualization illustrated the robotic on-site construction of villa walls using polystyrene, rebar and concrete.

2.5 Data Analysis

Miles & Huberman (1994), defines data analysis as consisting of three parallel activities which consists of data reduction, data display and conclusion drawing. Data reduction is regarding writing summaries and making clusters, data display is the organized assembly of information and conclusion drawing implies deciding what things mean and noting regularities and patterns. These analysis activities were followed during the compilation and analysis of the gathered data for this thesis.

The analysis was built on the data collected from the literature study, the global analysis, interview study as well as the conferences. Since the conferences took place well after the other data collections, they served most to support already gathered data. The analysis was iteratively performed with the findings from the literature study in mind. This was to see any potential equivalences between the different data collections made. The extent of the matching between the gathered theories and the collected data were evaluated and discussed to see that the results correspond to reality, i.e., that they are valid.

The gathered data from the literature, the interviews, the global analysis and the conferences were filtered, compiled and analyzed separately. The digitalization and automation challenges and benefits were the focus of the analysis since it was of most interest for the authors. The compilations were thereafter cross referenced to each other in order to find similarities. From the compiled data, conclusions were drawn.

2.6 Validity and Reliability

According to Yin (2014), in any social empirical research, four tests are commonly used to establish the quality of the research. These tests are construct validity, internal validity, external validity and reliability. Clarifications of these, as well as how they were approached in this thesis is documented in the following two subsections.

2.6.1 Validity

Construct validity discusses the quality of the translation or transformation of an idea, behaviour or concept, to a functioning reality, establishing ideas of cause and effect (Trochim, 2006). To strengthen and ensure construct validity the research findings should be shared and discussed with subjects of the research, to decrease the likelihood of reporting false findings and misinterpretations (Yin, 2014). Furthermore, to strengthen the construct validity, multiple sources of data should be collected, where the findings can be triangulated to see if they point towards the same result (Yin, 2014). This method of triangulating results from different data sources enhances the credibility of research work, eliminates bias and gives light to differences between results (Ghrayeb et al., 2011). Therefore, the data collection for this thesis included both literature, interviews, global analysis and conference attendings. The thesis research findings were also continuously shared and discussed with the Skanska mentor to ensure construct validity. This process served to keep the data which was of relevance to the research questions and the answering of them and to discard data which was not relevant. This served to validate the results from the data collection and his technical expertise helped to continuously guide the research in the right direction.

The research for this thesis was exploratory in nature, for this reason internal validity was not a concern, as explained by Yin (2014), that internal validity is mainly a concern for explanatory studies, where the causal relationships between events and their outcomes needs to be addressed i.e. how and why event x leads to event y. This logic is not applicable to exploratory studies since those are not concerned with this type of causal situation.

External validity however, is applicable regardless of research method and concerns the generalizability of the research findings. This means that for an externally valid research, the findings should be valid for both the specific study conducted and beyond, again

regardless of the research method used. With this in mind, conducting both a literature study and an interview study for this thesis served to provide opportunities to triangulate findings to strengthen the external validity of the results, since the literature findings were not specific for this thesis but holds true even if used for another, similar study. The conduction and findings from the multiple interviews helped breadth the gathering of data and the resulting findings. This contributed to a wealth of data from several types of companies, all of interest regarding the construction industry. This breadth helped to find patterns in the findings, leading to increased validity of the results since it corresponded well to the real world.

The conferences that were attended gave validity on how BIM and digitalization is used in the construction industry, since many of the speakers were experts in digitalization, construction and BIM.

A potential validity risk of this research could be the authors' lack of personal experiences regarding on-site construction work. This means that the authors' relied on collected data to assess the current state of digitalization and automation in the construction industry. On the other hand, this also helped the authors to not have presumptions and biases prior to the research.

2.6.2 Reliability

Reliability in research indicates that a later investigator should be able to conduct the same research and arrive at the same findings. A requirement for this is the documentation of the research methods and procedures. The purpose of research reliability is to reduce biases and errors in a study (Yin, 2014).

In this research only one employee from Skanska AB, Technical Specialist for the section Large Projects, partook in the interview study which could be considered a weakness in both validity and reliability since there is a risk concerning bias. However, according to the Head of Research and Development at Skanska AB claims that this Technical Specialist is one of the most experienced employees at Skanska AB (Skanska, 2017). The Technical Specialist has a M.Sc. at KTH in Civil Engineering and a Ph.D. at KTH in bridge engineering. The previously mentioned iterative sharing and discussion with the Skanska mentor also served to demonstrate the reliability of the results from the data collection.

Through the collection of data from additional interviewees from several other companies, the authors sought to increase reliability in the findings. The authors kept in mind that there was a potential risk that the employees from the interviewed companies were not entirely objective. Therefore, the data gathered from the literature study, other interviewees, global analysis and conferences was closely examined to see if the data from the employees matched the other collected data.

For reliability regarding this thesis, the procedures and findings were documented for the purpose of enabling a later investigator to follow the research steps and hopefully arrive at the same results.

3 THEORETICAL FRAMEWORK

This chapter starts with a description of automation in the manufacturing industry. This is then followed by a description of the construction industry in general and how the construction companies operate on-site. Benefits with automation, as well as challenges with automation implementations are also included in this chapter. Thus, the purpose of this chapter is to give an overview of automation benefits and challenges, as well as to provide information regarding relevant technology.

3.1 Industrial Automation

Industrial automation encompasses a broad area of different discipline such as machinery, process, software, information system and electronics that works together to common goals. These goals are improved quality, increased production, maximum flexibility and lower costs. Furthermore, these goals are in conflict with each other and it is difficult to balance these goals to a strategic advantage (Mehta & Reddy, 2015). The primary reason for automation is to increase productivity and efficiency which will lead to higher competitiveness (Frohm et al., 2006). Competitiveness, quality and reliability cannot be achieved without automation of manufacturing of processes of services or products (Sharma, 2011). The purpose of automation is to perform tasks more reliable with higher accuracy and more efficiently than humans at a lower cost (Frohm et al., 2006).

Automation can be classified into two categories dedicated and flexible automation, where dedicated automation is performed by specially made machines for a specific product, capable of producing large volumes at low costs and flexible automation can be utilized by an industrial robot since robots can be adjusted to a variety of changes such as flexibility in capacity, products, manufacturing and equipment (Bolmsjö, 2006). Industrial robots today are used in various sectors due to their flexibility and versatility that allows them to perform various tasks together with humans or substituting them (Carbone & Gomez-Bravo, 2015; Bolmsjö, 2006). The number of industrial robots has increased over the years and has a significant role in industrial automation and are vital to increase the level of flexibility and automation in modern production system (Bolmsjö, 2006). An industrial robot can be defined as an automatically controlled reprogrammable universal manipulator which can be programmed in a minimum of three joints that can be either mobile or fixed installed for use in industrial automation (Bolmsjö, 2006).

Common tasks which are suitable for automating are tasks which involve poor ergonomics and large production volumes, hazardous processes such as high voltage, toxic and nuclear where it is unsuitable for humans to operate (Frohm et al., 2006), complex processes such as heavy computing where the reaction time for a human is far too high and also sequential shutdown and startup of plants which is time consuming for human and error is a large risk (Sharma, 2011). However, situations where automation implementations are challenging are production processes involving of a high variation of products and manufacturing of products with short life cycles (Frohm et al., 2006).

Production volumes that are less than 500 units per year is considered low volume manufacturing (Jina et al., 1997). Furthermore, what characterizes low volume production is the production planning which often includes the whole make-to-order planning. Also, the products which are manufactured are of high complexity with a high amount of

technology, parts and components and its production systems are often characterized by a high level of flexibility (Bellgran et al., 2016)

Technical advancements in industrial automation have been made possible by faster computers, better networks, more reliable software (Sharma, 2011), advanced materials and smarter devices (Mehta & Reddy, 2015). In times of fast changing technologies and rapid development, maturity and replacement of products, many companies are turning to automation to become strong competitors on the demanding market (Frohm et al., 2006). Companies all over the world have automated their manufacturing processes which have led to billions of dollars in productivity and quality improvements. Consumer demands are driving these changes since they prefer more variety, better products, lower cost and fast deliveries (Mehta & Reddy, 2015).

Robots should have user friendly interfaces, be easy to use, proactive safety and sharing work space together with workers. Moreover, automated work tasks should not be a copy of how human workers execute work tasks, but rather be built on robot-oriented planning, management, engineering and labor training (Vähä et al., 2013).

3.1.1 Automation Benefits

According to Sharma (2011) the benefits with automation are faster results and response, higher reliability and security, increased safety for equipment and personnel, contributing to higher profit and revenue, higher availability and optimization of resources. According to Lundeen (2017), industrial robots in the construction industry have potential benefits such as improving quality, shorten project lead time, lowering project cost and increasing safety. All these benefits lead to higher operational efficiency and reduced overall operational costs (Sharma, 2011). The safety benefit could be due to the fact that operators are kept out of the automation system and thereby are humans protected (Frohm et al., 2006). According to data from a study made by Frohm et al. (2006), the major benefits from using automation in manufacturing, is that it empowers higher efficiency, lower costs within production, increases competitiveness, quality. Chu et al. (2013), agrees and adds that automation in manufacturing enables improvements regarding the working environment by handling the monotonous and physically heavy work tasks so that the human workers do not have to. As an example of automation, a brick laying robot can place 800-1200 bricks per day and humans can place 300-500 bricks per day which increases productivity (Usmanov et al., 2017). In research by García de Soto et al. (2018), they found that building complex walls with robotic construction have higher productivity than with manual labor.

3.1.2 Automation Challenges

Challenges with automation in the past was limited communication between the system and its users, large inventories were planned due to nonexistent real-time information, there was limited sharing of information between other peer industries on how the best practice is performed, the lack of non-coordinated system and limited information sharing to the executives from the plant floor lead to increased energy costs of operations. Challenges according to Bolmsjö, (2006) in the past where flexibility because of increasing demand for shorter product cycles. All these past challenges have been handled due to different trained operators and technology. The technology made data more available much faster and more affordable (Mehta & Reddy, 2015).

Current challenges of automation are more efficiency, demands for less waste, improved tracking, better quality, fewer human resources, higher demand for increased production with the same or fewer resources, reduction of energy usage and Blomsjö, (2006) agrees and adds that flexibility and the level of automation are increasing challenges. Challenges in automation and control are, engineering, improving machine uptime with safety applications, remote diagnostics, motion, process, multidisciplinary control systems, plant floor to enterprise connectivity and web access (Mehta & Reddy, 2015).

Technology trends are to move to modular and scalable system instead of a single large uniform solution. This approach makes the plant able to grow with the operations which reduces capital investment at the beginning. Collecting information from automated systems have become more qualitative to support business decisions and are collected more and more in real-time (Mehta & Reddy, 2015).

3.2 Construction Industry

The construction industry sector is an enormous sector which is of high importance to the worlds' economy. With a revenue of approximately 10 trillion USD per year, the engineering and construction industry stands for circa 6% of the global GDP (García de Soto et al., 2018). As an example, in the year of 2004, the United Kingdom's construction industry employed about two million people spread over 168,000 firms and contributed approximately £80 billion to GDP, yearly (Barker et al., 2004).

The construction industry is facing several urgent challenges that have become more important due to increases of environmental aspects such as reducing raw materials and energy throughout the life cycle of a building (Smith & Tardif, 2009). The construction industry is frequently considered as an industry with struggling with inefficiency, poor technological advancement (Lundeen, et al., 2017), excessive use of raw materials and energy (Smith & Tardif, 2009; Bock, 2015). Buildings are one-of-a-kind products that have become more and more complex (Oesterreich & Teuteberg, 2016; Eastman et al., 2008), it requires multi-disciplinary fabrication and design skills. The construction industry needs to develop more efficient, better, faster and less expensive ways to build, design, manage, use, operate, repair, maintain and demolish buildings (Smith & Tardif, 2009). Prefabrication and pre-assembling is increasing due to economics of scale and specialization in different areas in the construction industry (Eastman et al., 2008).

The construction industry has generated information in different forms for a long time, with examples such as construction drawings, scale models, building permits, bills of materials, field reports, photographs, warranties, as-built drawings, material disposal certificates, punch lists and many other documents. These documents have not been integrated into a single platform and there is a risk that the same mistake will be repeated with digitalization (Smith & Tardif, 2009). For 50 years ago, a documentation of a building consisted of between 30 to 40 sheets and today there are about four times as many (Krygiel & Nies, 2008). Design documents of an entire building can be stored in a database by utilizing BIM (Krygiel & Nies, 2008). The construction industry's primary challenge is more on how to exchange and organize information that are created instead of deploying modern technology (Smith & Tardif, 2009).

Most of the construction takes place on-site but up to one-third of the construction processes are carried out in factories (Smith & Tardif, 2009). Aspects that are hard to control are

weather conditions and the quality and supply of labor (ibid.). The construction industry is regarded as a craftsmanship (Smith & Tardif, 2009) and is a reason why the construction industry has low a low level of automation (Bolmsjö, 2006). There is a lack of statistical data in the construction industry which makes it impossible to measure effect on productivity when implementing new technologies or making improvements. Since the implementation of new technologies is so hard to measure, the likelihood for innovation to transpire is low since there is a risk that the new implementations' success or failure cannot be measured (Smith & Tardif, 2009). The slow innovation rate in the construction industry could be the absence of reliable business data. Furthermore, the overall construction industry suffers from deficient technological advancement and productivity gains, compared to other sectors, even farming (ibid.).

In the construction industry an industrial robot has working condition of loose tolerances, imperfect measurement and large workpiece uncertainties where for example in the manufacturing industry the requirements are tight tolerances, accurate measurement and rigid workpieces (Lundeen et al., 2017). The construction industry does not have ideal condition to implement industrial robots due to high variety of tasks performed and are encircled by disorganized materials (Chu, et al., 2013)

Tower cranes are commonly used equipment on construction sites for moving equipment, materials and personnel in a horizontal and vertical way. Since cranes are deployed outdoor it makes them sensitive to external disturbances (Chen et al., 2017). Cranes demand a large workspace and have a high impact on the efficiency and safety of the overall construction project. Crane systems are imprecise which make them difficult to control (Chen et al., 2017). Crane operators have significant responsibility since accident have a catastrophic effect on fatalities, injuries, cost and schedule delay (Fang & Cho, 2017).

3.2.1 Automation in Construction

An industrial robot that operates in the construction industry must model and sense their actual environment despite having access to the virtual model of the building, BIM (Lundeen et al., 2017). The purpose of Lundeen et al., (2017) research was to develop the means for a construction robot to perceive its environment could make adaptive decision to perform work tasks autonomously. Feng et al., (2015) used a single camera and designed an algorithm to enable a manipulator on a mobile robot to identify and grip a building components autonomously and assemble the components into modular structure that are pre-designed. A robotic beam assembly system is presented in Chu et al., (2013) research where a vision system could track the positions of the bolting of the steel beam to which the robot bolted the steel beams together. Navigating a Unmanned Ground Vehicle (UGV) in a dynamic and cluttered environment is performed by providing sensory information to a Fuzzy Inference System (FIS) for solving navigational challenges (Almayyahi et al., 2017).

Labonnote et al., (2016) research shows that 3D printing technologies be implemented for large-scale structures in the construction industry successfully. A new routing method of 3D printing ultra-high performance concrete is performed by using a 6-axis industrial by extruding concrete layer-by-layer through an extrusion printhead (Gosselin et al., 2016). Construction of a complex concrete wall in the modular research building called the DFAB HOUSE in Switzerland, using an industrial robot for the process steps: erect formwork, install reinforcement, place concrete and strip formwork (García de Soto et al., 2018).

Anna Kochan (2000) wrote that during the 16th International Symposium on Automation in Construction, 1999, Stefan Moser presented a paper he had been working on, where he had been developed a manipulator for spraying concrete on to a surface in a way that a minimum amount of concrete rebounds off the sprayed wall. This manipulator can be operated manually, semi-automatic or fully automatic.

In Usmanov et al., (2017) research an industrial robot that uses data from BIM for bricklaying which include, gripping, gluing, applying mortar and cutting bricks, and depallitizing.

There is a challenge in the construction industry to implement digital technologies and in Teizer et al., (2017) research Internet of Things (IoT) is used for integrating localization and environmental data into a cloud based BIM platform. Furthermore, in their research, data could be collected and visualized in real-time from actual projects. In a paper by Kočovski & Stankovski, (2018), they developed a computer architecture for facilitation of IoT applications for useages in the construction industry which could be used to support monitoring, control, safety, collaboration, supply management, etc. in real-time.

3.3 Existing Technologies

The technologies in this section are relatively new and are either implemented in the construction industry at various degrees and in different ways, or emerging technologies which can be of use in the construction industry. Several of the modern technologies are digitally based and will need computers, sensors and data to be functional. The technologies for this thesis were chosen because they were prominent in many articles found during the literature study, which led to further study of those, leading to their inclusion.

3.3.1 Artificial Intelligence

Artificial Intelligence (AI) communicate with programs that have the abilities to make decision to solve problems. AI can be used for interpretation, perception, learning, reasoning, decision making and communication (Kumar, 2017). Key characteristics of AI are better handling, adaptive control and stored knowledge that can be reused. AI system have been developed for virtual reality, computer vision, robotics, image processing, automation, automated reasoning, pattern recognition, process planning, etc. (ibid.). Machine learning (ML) are increasing in industrial settings and low barriers are allowing for innovations that the manufacturing industry are starting to gain benefits from (Sharp et al., 2018).

3.3.2 Additive Manufacturing

3D-printing have been attempted several times in construction for the purpose to reduce construction time, increase customization and improve affordability (Wu et al., 2016). Cementitious material that can be 3D printed is a promising and innovative construction method that have been growing in recent years (Ma et al., 2018; Wu et al., 2016). The 3D-printing process works by adding material in layer by layer which builds a structure up via a computer designed file (Ma et al., 2018; Gosselin et al., 2016). Previously, additive manufacturing has only been used in biomedical and aeronautical industries due to high cost for materials (Gosselin et al., 2016). Additive manufacturing can reduce construction time,

increase customization, reduce construction cost and manpower. Additive manufacturing is limited by the lack of development of BIM and large-scale implementation, life cycle cost and mass customization requirements (Wu, et al., 2016). Contour crafting is when the external and internal skins of the wall is 3D-printed and is later filled with a concrete substance (Wu, et al., 2016). Factors that must be considered are availability of printing materials, accuracy of the printing, printing time and the printing process cost (Wu et al., 2016).

3.3.3 Drones

Unmanned Ground Vehicles (UGV) are purpose-built transportation machines that are programmable and by using sensors information can be gathered and extracted from its surrounding without human intervention (Almayyahi et al., 2017). According to Tatum & Liu (2017), drones, or Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), are aircrafts which are unmanned and controlled by a pilot on the ground. Drones can also, more broadly, refer to equipment which is operated independent of human control. In recent years UAV have been easier to control, more reliable and less expensive due to technology advancements (Tatum & Liu, 2017). UAV can be used to inspect structures, quantifying material in landfills, construction monitoring and deterioration analysis (Freimuth et al., 2017). According to Tatum & Liu (2017) 61 % of the construction industry in the U.S use UAVs in some way and mainly for video and photos and Bouge, (2018) said that in the UK the number is 12 %. Some risk can be avoided when using UAVs instead of for example inspections on scaffolds (Tatum & Liu, 2017).

According to Tomita et al. (2017), drones can be used for a task in building equipment works in which air volume is measured. This task is conventionally performed by workers where they have to manually approach the ceiling and take measurements of the air volume just under the air diffuser, using a handheld anemometer. This is a process which has low productivity and require extensive safety management. Tomita et al. (2017) found that measurements, of satisfactory accuracy, can be made using a UAV in place of a worker, which is less time consuming and presents less risk of injury.

For complex tasks that will be carried out by a machine, a vision system should be installed. Artificial vision systems can be used in automated inspection, vehicle guidance, surveillance, biometric measurement, traffic control and monitoring, robot assembly and analysis of remote images (Davies, 2012).

3.3.4 Internet of Things (IoT)

IoT's relevance when discussing digitalization and automation in construction is evident, as Kochovski and Stankovski (2018) states, that IoT elements such as electronic signalization, robotics, sensors, actuators and other internet connected devices may soon make available innovative smart applications in the construction industry. Bouge (2018) states that robotics is expected to play a leading role in technological innovation for overcoming the current limitations in the construction industry, such as material waste and poor productivity.

There is no uniform and clear definition of what IoT is since it is constantly changing (Zhang & Tao, 2017), but there is a simple definition of the Internet of Things according to Waher, (2015, p.32) is:

“The IoT is what we get when we connect, Things, which are not operated by humans, to the Internet.”

This definition correlates to four components which are connection that are linked to communications protocols, things are linked to actuators, sensors, controllers, etc, non-operation by humans to provisioning and the internet are linked to security, authorization, interoperability and more (Waher, 2015).

IoT constitutes of different devices such as sensors, Radio-Frequency Identification (RFID) tags, mobile devices, embedded computers, actuators and computers that are interconnected through a world-wide network. IoT can be used to build decentralized systems with smart objects that can exchange information and cooperate with other computing devices, humans and have some autonomy (Ochoa & Fortino, 2017; Zhang & Tao, 2017). IoT provides real-time data to be collected and communicated within a system which makes it more intelligent and increase transparency and flexibility (Zhang & Tao, 2017). IoT provides solutions and standards that are Internet-based and open source and can gather data from all machine or devices (Georgakopoulos et al., 2016). Important part of IoT communication system is interoperability, connectivity and integration (Buyya & Dastjerdi, 2016). Reliable computing system is important to build so that the system can operate without failure which is a requirement for scientific and business community (Buyya & Dastjerdi, 2016). Key challenges of IoT is advancing the use of AI, interoperability between different platforms, creating simple user experiences and data protection (Briodagh, 2017). The IoT devices needs to talk to each other and the internet based on the current situation (Buyya & Dastjerdi, 2016). IoT needs AI to analyze and interpret data and since a large volume of data will be generated which cannot be handled manually since instant decision making is critical (Briodagh, 2017).

Trillions of IoT could in the future be connected which is much more than the regular internet who serve billions (Hofmann & Rusch, 2017). There are more than 2 billion smartphones connected to the internet and IoT is expected to reach 50 billion by 2020 according to Buyya & Dastjerdi, (2016) and 20 billion according to Kochovski & Stankovski, (2018). In the construction industry the use of IoT can enable smart applications for usage in the near future such as sensors, robots, electronic signals, actuators etc. which could support monitoring, control, safety, collaboration, supply management, etc. (Kochovski & Stankovski, 2018).

Confidential information should only be accessed by authorized entities such as company members, gateway and security system which means that data transfers must be secure so that it provides end-to-end security (Buyya & Dastjerdi, 2016). Development challenges of IoT are among other things about the security which the industry and the research community are trying to solve (Ochoa & Fortino, 2017). Service provider have their focus in interoperability and availability which is why the security aspects has been mainly unattended. IoT sensors and devices can gather large amount of data but are very limited in battery, memory and computational power (Buyya & Dastjerdi, 2016).

Industrial Internet of Things (IIoT) is used by high-tech companies and it consists of big data analysis, machine to machine (M2M) communication and machine learning techniques. M2M allows for machines to relay and communicate information (Briodagh, 2017). Companies that use IIoT can find and correct problems faster since humans are not as

accurate in data collection and communication which saves time and money (Buyya & Dastjerdi, 2016).

Internet of Vehicles (IoV) is communication between vehicles and vehicles, vehicles and roads and vehicles and cities by using different kinds of mobile-communication technology. IoV makes it possible for collecting and sharing data about roads, vehicles and the surroundings. These data can be used to supervise and guide vehicles. IoV can also support intelligent vehicles control, intelligent traffic management etc. There are several different researches in IoV such as cloud computing, autopilot vehicles, intelligent transportation and mobile computing. Application for IoV are efficient service, driving safety, information services and intelligent traffic management. IoV will revolutionize changes in both functionality and technology (Buyya & Dastjerdi, 2016).

When setting up a simple IoT infrastructure, key requirements that must be considered are that the hardware and software should have a low cost, choosing high-level programming languages, possibility for enterprise scalability, hardware should be available and commodity and some experience in computing and electronics is required (Buyya & Dastjerdi, 2016).

3.3.5 BIM Building Information Modelling/Management (BIM)

BIM is a digital representation of functional and physical appearances of a facility (Dupont et al., 2017; Krygiel & Nies, 2008), and it has information about spatial relationships, geographical information, geometry, properties of building components, quantities and light analysis (Vähä, et al., 2013). Even when an accurate model is created there is a risk that human errors could occur during the installation and finding these early are of immense value (Eastman et al., 2008). BIM also have the ability to gather all design process stages of a building into a database (Krygiel & Nies, 2008). A digital model can be created with BIM technology that contains data to support the construction, precise geometry, procurement activities and the lifecycle of a building that can provide a ground for new construction capabilities (Eastman, et al., 2008). A definition of BIM is the use and creation of computable, consistent and coordinated information about the design in a building project, parametric information is used for cost estimations, production of construction documents, decision making, building performance and construction planning (Krygiel & Nies, 2008). The research of BIM is growing and there is a rapid adoption and development in BIM technologies (Zou et al., 2017; Krygiel & Nies, 2008). Building Information Modeling (BIM) is used in Architecture, engineering and construction (AEC) and is developing the most (Eastman et al., 2008; Krygiel & Nies, 2008). BIM can be seen as a collaborative process that cover design, construction and also the maintenance process which provides information to all parties that are involved in the project (Ghaffarianhoseini et al 2017; Krygiel & Nies, 2008). BIM has been seen as a solution to collaboration in the construction industry but in Liu et al., (2017) research they found that in some projects in collaborative design and construction that collaboration is limited despite working with BIM technology.

BIM is an empowering technology, although its implementation is more of a business decision than a technical decision, which use has several potential benefits such as improve the quality of information for decision making, improve communication between business partners, reducing cycle time, improving the quality of delivered services as well as cutting costs at every stage in a building's life cycle (Smith & Tardif, 2009). To unlock the most of

these benefits many businesses must change their processes and workflows, since BIM itself will not provide these benefits, only provide the possibilities of these benefits (ibid.). Advantages with BIM is reduced project duration, lower cost and better-quality buildings (Eastman, et al., 2008), predict collisions, calculate time and material quantities and show environmental values on building designs (Krygiel & Nies, 2008). When using BIM better decision regarding costs can be made than of a system that is paper-based (Eastman, et al., 2008). BIM can also be used for simulation purposes that reveals for each day how the building will look like which leave rooms for improvements and potential problems such as safety problems, equipment, conflicts, crew, site, space etc. (ibid.).

Temporary construction objects can be added into BIM, such as scaffolding, shoring and cranes and be linked to schedules (Eastman et al., 2008). Today BIM is generally used for planning since it does not typically contain as-built information (Vähä et al., 2013). BIM could provide a precise model, scheduling and planning could be performed with high accuracy (Krygiel & Nies, 2008), with just-in-time arrival of equipment, people and materials (Eastman et al., 2008). Benefits from using BIM for fabricators and subcontractors are reduced cycle-times, data for automated manufacturing technologies, enhanced rendering and marketing and improved prefabrication and pre-assembly (ibid.). Close collaboration with construction and design teams is possible when adopting BIM, which will make construction deliveries more reliable, less costly, reduces errors and enables faster processes (Eastman et al., 2008; Krygiel & Nies, 2008). There are several benefits for facility managers and owners when using BIM such as using the as-built information as a database for spaces, rooms and equipment to optimize facility maintenance and management and improve overall building performance through energy analysis and design (Eastman et al., 2008), furnishing and scheduling in the project (Krygiel & Nies, 2008).

Utilizing BIM in the construction industry has major advantages that saves resources (Eastman et al., 2008). With the utilization of BIM, the scattered documentation system can be replaced by an intelligent system with a central database that is able to analyze data instantly (Krygiel & Nies, 2008). A building model that is as-built benefits the project team and all members in it (Eastman et al., 2008). It reduces conflicts and errors and the planning process becomes smoother (Eastman et al., 2008; Krygiel & Nies, 2008). In the project planning phase contractor's knowledge is seldom utilized due to traditional design-bid-build method which they could have add significant value, those contractors that are working in collaboration during the design phase with project teams encounter fewer BIM related barriers in adoption (Eastman et al., 2008). In a design-bid-build process the consultant and architect design the building and then send to contractors who place a bid on the job (Krygiel & Nies, 2008). Typically, collaboration does not start until the low bid contractor has been awarded the job when working in a design-bid-build environment (Eastman et al., 2008). Documents are usually sent back and forth between project members which increase the risk of errors and miscommunication (Krygiel & Nies, 2008). It is important that contractors must try to involve fabricators and subcontractors in an early stage in the project (Eastman et al., 2008). Close contractor coordination is one of the most important aspects since clash detection and correction of these can be avoided before problems occurs which also allows for increased prefabrication which improves accuracy and reduces field time and cost (ibid.). A strong point of BIM is the sharing of information, as Smith & Tardif (2009) points out, where they put emphasis on the fact that creating a single building model is not the end goal with using BIM, but rather to compile all-inclusive accessible and reliable building information which should be easily exchangeable for anyone who desires it, at any point in the building's life cycle. However, a challenge in sharing BIM online is cyber

security since data is accessible to team members which means that copyright infringement and unauthorized access could become a problem (Ghaffarianhoseini et al., 2017).

BIM is commonly used in the engineering and design phase and there have not been many attempts to combine BIM with sensors for the purpose to have a real-time data storage of the building (Vähä et al., 2013; Dupont et al., 2017). Successful BIM implementation should be done throughout the whole company and it requires that management and other key employees attain full understanding of how work processes are supported by BIM (Eastman et al., 2008). In order to expand the use of BIM in operation, adaptive and flexible data collection systems need to be created that can provide physical data into a software system (Dupont, et al., 2017). The BIM technology is not the current bottleneck but rather the absence of knowledge in employees stands in the way of widespread implementation (Eastman et al., 2008). It is a significant learning curve in using BIM technology and contractors should be aware of this (Eastman et al., 2008). The transition from drawings to a digital model is not easy since changes must be made in almost every business relationship and process. Furthermore, to make the transition as smooth as possible it is important to attain consultants that can help to guide the transition and plan changes carefully (ibid.).

Technologies that can be used with BIM are for example machine-guidance, laser scanning, GPS and RFID. Machine-guidance can be used by earthwork contractors by extracting information from BIM to verify and guide excavation activities. Laser scanning can report measurement data directly into BIM to capture as-built information. GPS gives the contractor the ability to verify locations of the building model. RFID can be used to track installation and component delivery on-site and can provide contractors with field progress and installation (Eastman, et al., 2008). Sensors can be used by robots to obtain as-built information and update that information automatically into BIM (Vähä et al., 2013). Advance sensors and BIM will have a large part in automation in logistic, prefabrication and on-site operations (ibid.).

BIM is a work in progress and developments of it makes it more widespread. The cost of a digital model of a building is estimated to around 0.1 % of the total construction cost which is offset by savings in fewer workers on-site, shortened project durations, improved collaboration and better prefabrication options (Eastman et al., 2008). Building processes have been developed in the construction industry through many years and few of these “standard” procedures and practices have been documented (Smith & Tardif, 2009). Activities that involves information exchanges and all activities that are required to construct a building must be documented. It demands too much resources for a single organization to do this job which means that the whole industry must work together to accomplish this (ibid.).

Migilinskas et al. (2013), states that the implementation of BIM technology will lead to benefits such as improved efficiency in the construction industry, through increased collaboration between the different parties involved in the projects, as well as fewer collisions and a lowered need for corrective work and adjustments.

4 EMPIRICAL FINDINGS

In this section, Skanska and the results that have been obtained from empirical facts and the data collections are presented.

4.1 Introduction of Skanska

Skanska was formed in 1887 in Sweden and is one of the biggest construction companies in the world with 40 800 employees in ten countries in Europe and in the U.S. 9 200 employees are located in Sweden. Skanska's core function is to build, develop and to maintain buildings, infrastructure, hospitals, schools, maintenance etc. In Sweden Skanska is divided into four main areas which are residential development, construction, infrastructure development and commercial real estate development. Residential development is targeting specific markets and groups and the core is to increase the quality of life. With every new project, substantial analysis is carried out and Skanska adjust their proposition based on people's needs and dreams. Construction is the oldest and the largest branch which renovates and builds factories, houses, housing and infrastructure. Infrastructure development are developing sustainable solutions for hospitals, schools and roads. Commercial real estate development invests, initiates and develops commercial real estate. The projects are long-term and can take between five to ten years from idea to finished building (Skanska, 2018).

Skanska has a vision with zero injuries at the work site which is their top priority and they have been working on increased safety since the year 2000. Skanska also has a vision to be climate neutral in their entire value chain in 2050 and is working hard to reach this goal (ibid.).

Skanska searching for automated solution to implement that can increase productivity and safety and reduce heavy and repetitive task for construction workers which is the reason behind this thesis.

4.1.1 Skanska's Automation State

Skanska generally has no automation that is widespread and fully implemented. However, Skanska have begun to use advanced technologies for aiding in different construction phases. Skanska is funding several research projects and one of these is called ARRAY (Automation Region Research Academy) which is an industry research school for Ph.D. students. The research school is in collaboration between Mälardalen University, ABB, Volvo CE, Skanska, Sandvik, First Control, Automation Region, Robotdalen and RISE SICS Västerås and will start in the fall of 2018 (Sektionen för kommunikation och externa relationer, 2017).

Skanska, Volvo CE, Swedish Energy Agency (SEA), Mälardalen's and Linköping's universities have established a collaboration in developing construction machines that are running on electric batteries instead of diesel. The cost of the project is €22 million and will be tested in 2018 and Volvo estimates that energy usages will be reduces by 71 %. The machines will be used in a quarry for testing since it has a less dynamic environment than a construction site. Machines that are fully electric could be used in the future to be fully autonomous, guided by computer (Volvo CE, 2017).

Skanska has, in collaboration with Robotdalen, developed an automatic rebar station in scale 1:3. The purpose of the station is to build prefabricated reinforcement cages on the construction site and then lift the cages into place, one by one. There are three industrial robots mounted in a gantry that are collaborating in lifting the rebars and lashing them into place. Building these cages manually on-site is heavy and not ergonomic and is therefore an optimal work task to automate. The plan is to build an automatic rebar station in full scale and use it for large construction projects.

When Skanska was reproducing a bridge in the city Arboga which was finished 2012, they worked only with digital drawings. The digital model was updated on-site if there were any changes. Skanska had a BIM department that used the program Tekla Structures on-site for aiding the construction workers and making adjustment in the digital model as the work progressed. Tablets were used to view the drawings instead of on paper.

In Sweden, the project planning is typically not finished when the on-site construction begins which means that many questions must be solved on-site. Skanska uses BIM in visualization and planning since several years back and all employees have access to it. Skanska can reduce a lot of disturbances with BIM and it is a natural part in their projects. However, the use of BIM generally stops after the project planning, but Skanska have made several projects where the BIM-model was updated and alive throughout the entire construction phase. Skanska has a global expert group that have regular meetings where they share information and experiences among the countries.

Skanska Hus is a subdivision of Skanska that constructs buildings in the range of 30 million SEK or more. Skanska Hus prefers to build new buildings since refurbishing projects often adds unforeseen costs. During the construction phase, they use building methods that are well established. Skanska Hus tries to implement digital tools in the process and wants to set the bar high regarding digitalization. Before every building project starts they decide which tools and machines will be necessary for the project. These must then be rented from Skanska Rental or purchased from a retailer. Skanska Hus mostly uses prefabricated construction elements since it is usually cheaper and smoother to work with than casting on-site. Skanska has a meeting every week where sometimes new technologies is discussed, and how leftover material can be used from finished projects.

Skanska Rental is one of the big actors in Sweden when it comes to rental of machines and equipment. Their machine portfolio contains everything from an electric screwdriver to cranes and elevators. Their equipment and machines are leased to many actors in the construction industry, including Skanska. Skanska Rental acts as a guide and work closely with their customer. Currently Skanska Rental does not currently possess any automated equipment or machines, but they are constantly updating their machine portfolio. The customer demand is an important factor when choosing equipment and machines and all project are unique.

During the thesis work, Skanska expressed interest in exploring the possibilities of using existing technology for automating the on-site construction of villa walls, of the type referred to as sandwich. These walls are utilizing a zigzag rebar technique in prefabricated blocks of polystyrene which, after the assembly, gets covered in concrete on both sides of the wall. This example case was used to create a near-future concept of implemented CA, illustrated with Solidworks 2017-18.

4.2 Global Analysis - State-of-the-art implementations

These state-of-the-art implementations companies are either new or already established in the construction industry at various degrees and in different ways, or emerging and will likely be established in the construction industry in the near future.

Fastbrick which is an Australian company is currently developing the Hadrian X that will soon be launched onto the construction site and will build brick houses with a crane that is mounted on a truck. According to Fastbrick they will improve safety, cost, accuracy, waste management and speed in the construction industry. Hadrian X have millimeter precision due to a multi-axis stabilization system that stabilize the motion of the long boom. CAD-files are used to guide to robot (Fastbrick Robotics, 2018). Caterpillar Inc. and Fastbrick have signed Memorandum of Understanding (MOU) for collaboration on how Fastbrick Robotics technology can be developed and are discussing questions regarding manufacturing, service and sales. The MOU spans for twelve months which can be expanded when the term has ended or terminated at any time by both parties. Fastbrick deals exclusively with Caterpillar during the MOU for commercialization and development with Fastbrick's technology (Caterpillar, 2017). Caterpillar is a company from USA and is leading in natural gas and diesel engines, manufacturer of mining and construction equipment, diesel-electric locomotives and industrial gas turbines (Caterpillar, 2017).

nLink is a company from Norway which uses an industrial robot together with a mobile platform from Alitrak and a scissor lift to drill holes with high precision in the ceiling on the construction site. The holes coordinates are based on a BIM model or construction drawings and all holes are registered to keep BIM models and drawings updated. The robot is controlled by an app and a laser and work alongside with construction workers. Safety will increase, and project completion will be faster by using nLink drilling robot which are in demand all over the world by mechanical, electrical and plumbing contractors (nLink, 2017). Alitrak is a manufacturer of electric vehicles that runs on batteries and their product DCT-450 is a remote controlled electric vehicle on caterpillar treads. DCT-450 have a loading capacity of 450 kg and a weight of 463 kg (Alitrak, 2018)

Build-r is a company from Sweden that uses an industrial robot mounted onto a mobile platform to install drywall on the construction site which increases the productivity and relieves workers from monotonous and heavy tasks. Build-r's robot will work alongside workers and be used to unlock the night shift (Build-r, 2018). There are currently two-thirds of the day and night that the construction is standing still. Build-r's drywall robot will increase production in the construction industry by installing drywall at night. There is a need for higher production in the construction industry since 700,000 new housings are to be built by the year 2025. Many contractors such as painters, electrician, plumbers depend on the drywall installation being done on-time since their work tasks are done afterwards (Smart Built Environment, 2017). Build-r are collaborating with both ABB and NCC and have received grants from Smart Built Environment (Build-r, 2017).

MX3D is an additive manufacturing company located in the Netherlands and use industrial robots for creating new ways for robots to 3D print metal in any shape and size. MX3D are collaborating with ABB, Autodesk, Air Liquide & Oerlikon and several other companies to make their technology available to industry. They are currently 3D printing a steel bridge in a factory that will be installed in 2019 in Amsterdam. They believe that machine learning and AI will make robots better to perform their tasks and that automation will become a

standard in producing unique computer-generated structures and part within 10 years. The aim of MX3D is to build robust machines for heavy-duty industrial use outside and for on-site construction. Their software would be adapted to all the different manufacturer of robots and welding machines (MX3D, 2018).

ETH Zürich is a university for technology and science in Switzerland (ETH Zürich, 2018). ETH Zürich are currently building a three-story building with 200 m^2 floor space called DFAB HOUSE (digitally fabricated house). This house is the first building in the world to be planned, built and designed using mainly digital processes. Several experts, scientists and engineers from ETH Zürich are collaborating with business partners to take new digital technologies from the laboratory into practice. When using several digital building technologies together it is possible to use their individual advantages and their synergies. Technologies that will be used are 3D printing for formworks for ceiling slabs and industrial robots that builds walls. ETH Zürich use a two-meter-high robot mounted on a platform that moves around with caterpillar tracks. The robot fabricates a curved steel wire mesh wall that acts as a reinforcement of the concrete and formworks. Cooperating robots will prefabricate two individual rooms using Spatial Timber Assemblies. A large 3D sand printer will be used to form the formworks of the ceiling slab. The purpose for this project is to examine how construction can be more efficient and sustainable as well as how to improve designs with the use of digital technologies (ETH Zürich, 2017).

Komatsu, which is a Japanese company and one of the largest manufacturer of mining and construction equipment, have chosen NVIDIA from USA as a partner for introducing artificial intelligence to the construction site for increasing productivity and safety. Nvidia will analyze and visualize the entire construction site with their Graphic Processing Unit (GPU). Nvidia have an AI platform called NVIDIA Jetson that will function as a brain for the heavy machinery on-site. Nvidia's CEO and founder Jensen Huang said that mining and construction industries will benefit in both efficiency and safety since heavy machinery will be able to perceive their surroundings. Improvements made by AI will be suitable for the construction industry since construction sites are considered hazardous due to uneven terrain, heavy equipment and continuous activity. As an example, in Japan 2016 there were 15,000 injuries and 300 deaths in the construction industry (Nvidia, 2017).

Construction Robotics from USA have developed and implemented a brick laying robot called SAM100 on the construction site for setting up the final wall. SAM100 increases productivity by three to five times and reduces lifting by 80 percent. In addition, it also reduces labor by 50 percent and increases safety and health. It is a collaborative robot that work alongside with masons and have worked together with 148 masons at 29 different construction sites (Construction Robotics, 2018). SAM100 has the capability to lay 2,000-3,000 bricks in a day, which can be compared to a human worker's average of circa 400-500 bricks per day. (Bouge, 2018)

Odico Formwork Robotics from Denmark can produce affordable and fast, complex, architectural geometries which would otherwise be expensive. Odico claims that their technology can improve the efficiency up to 100 %, compared to existing solutions. They are the first company to use industrial robots to cut advanced casting molds in expanded polystyrene with their own developed software. Odico provides hot-wire cutting, hot-blade cutting, milling, clay cutting, abrasive wire cutting and coating technologies which is all done with an industrial robot, or several robots working in collaboration (Odico Formwork Robotics, 2018).

4.2.1 State-of-the-art summary

A summary of the state-of-the-art implementation can be seen in *Table 3*.

Table 3 – Summary of the state-of-the-art

Company	Key area of business	Possible to automate in construction	Automation benefits in construction
Fastbrick	Automatic bricklaying	Bricklaying on-site	safety, cost, accuracy, waste management, speed
nLink	Drilling holes on-site with coordinates from BIM	Drilling on-site	High accuracy, speed
Build-r	Automation in construction	Installation of drywalls, screwing	Increase productivity, reduce heavy and monotonous task
MX3D	Additive manufacturing	3D printing of steel bridges	Complex shapes
ETH Zürich	University: digitally fabricated house (DFAB)	3D printing for formworks for ceiling slabs, industrial robots that builds walls, Spatial Timber Assemblies,	Possible more efficient and sustainable
Komatsu	Construction equipment	Autonomous construction vehicles	Increase productivity and safety
Construction Robotics	Bricklaying	Semi-automatic bricklaying	increases productivity, safety, health and reduce labor
Odico	Produce complex architectural geometries	Cutting and milling complex shapes	Improve speed and efficiency

4.3 Industrial robots

Industrial robots from ABB Robotics have a lifting capacity from 0.5 kg up to 800 kg and can today both feel and see objects with the aid of Force Control and True View. Typical work tasks for industrial robots are packing, welding, serving machines, lifting, painting and grinding, usually tasks that are heavy and unhealthy for workers. ABB's robots can be placed on the wall, floor or on a rail. ABB's industrial robots must be able to work fast and precise and handle fast accelerations and decelerations. The robots have a precision of 0,7 millimeter up to 0,07 millimeters (ABB, 2018). ABB's smallest robot have a weight of 38 kg (ABB, 2017) and the largest a weight of 4574 kg and their lifting capacity is 0.5 kg and 800 kg respectively (ABB, 2017).

FANUC's industrial robots have a lifting capacity from 1 kg up to 2300 kg and the weight are about 20 kg and 11000 kg respectively (FANUC, 2018). IRB 4600 have a weight of 435 kg, reach of 2.55 meters and a payload of 40 kg (ABB, 2018). M-710iC/45M have a weight of 570 kg, reach of 2.6 meters and a payload of 45 kg (FANUC, 2017).

4.4 Work Tasks Required for Building Sandwich Walls

The material that a sandwich wall consist of is a core of polystyrene plates that have stainless steel zigzag wire throughout the entire plate and both sides of the wall consist of concrete. The tools required to manually install these sandwich walls is a saw, a brick trowel, a finishing trowel, a cutting plier and a rebar tie tool. Manual work task for construction of sandwich walls are placing the polystyrene plate on the concrete plate and attaching it to a stud with the rebar tie tool. The rebar net is then placed on both sides of the polystyrene plate and are attached with the rebar tie tool by folding the zigzag wire that sticks out of the polystyrene core over the rebar net at several places. The wall is then sprayed with concrete on both sides and lastly the concrete is smoothened out with the finishing trowel. The polystyrene plate is cut with the saw and the zigzag steel wire is cut with the cutting plier when the polystyrene plate need adjusting.

4.5 Interview Study

A total of 11 interviews was conducted with 10 different companies, some of them was in the construction industry and some were in the manufacturing industry. The results are presented company by company since the companies are operating in different business sectors and therefore differ significantly, although digitalization an automation is a relevant topic of discussion for all of them.

4.5.1 Unibap

Unibap AB has developed a vision system for industrial robots. The long-term goal of Unibap is to teach robots to mimic a human workers way of working, i.e. they are enabling the robots to see, learn and to become more flexible. Unibap makes the robot see, which is the most powerful sensor (compared to our senses). The robot can detect safety issues and more with the vision system. Unibap are working on implementing the description of the work task directly into the CAD programs which removes all the steps of robot programming that currently are required. They are initially developing a plug-in for the CAD program Solidworks and will develop a plug-in for other CAD programs such as Catia and Creo later. Unibap's system is self-adjustable which means if a mobile platform is used their system can handle variations in the environment. Unibap's system have an accuracy of 2 micrometers due to the use of a stereo camera that is self-calibrating. Their system calibrates itself by a few references, for example three walls. By looking at the walls, the correct coordinates are located. The tool cannot be seen by the vision system since it is located under the camera, but by adding a mirror the camera can even locate the tools coordinates when looking into the mirror and then measuring the location of the tool, this method is an approved patent. According to Unibap the biggest challenges about automation is to reduce the requirement of large development resources such as programming and preconceptions about automation. Modern production is requiring more and more flexible automation. All kinds of tasks can be automated, and the low hanging fruits will be taken first.

4.5.2 ABB Robotics

ABB Robotics sells industrial robots, where the smallest robot has a pay load of 0.5 kg and the largest 800 kg. They are mainly used in industrial environments. With the introduction of force control, it is possible for a robot to feel pressure and torque which enables many more work tasks to be automated. Previously, work tasks such as post processing of parts, such as grinding, and assembly tasks were hard to automate. Force control makes it possible for an industrial robot to perform such tasks, where parts need to be handled with a certain amount of pressure and torque. According to ABB Robotics, safety is a challenge and have always been. The space in a factory is limited and costly and reducing the robot cells require less safety devices. The main challenges of today are short product cycles, digitalization, low volume and many change overs. All companies are calculating the return on investment (ROI) of automation and to see if it is beneficial. Nothing is impossible, it is more of a financial issue, than a technological. ABB Robotics believes that the electronic industry will become much more automated due to collaborative robots. The pharmaceutical industry is highly automated with high volume with a low variation of products but since the market is changing automation will be more robot oriented than machine oriented which is the same for the food industry. A new trend with automation is to move around machines and robots for enabling it to perform more work tasks because of low volume and high product variation. One challenge with mobile robots and machine is electric cables. Automation becomes cheaper for every year and the degree of automation is constantly increasing.

4.5.3 Trimble Solutions Sweden AB (BIM Expertise)

One of Trimble Solutions Sweden AB's, strengths are their BIM expertise. Trimble Solutions Sweden AB is developing BIM software for the construction sector and they have competence for the entire chain, from project planning to maintaining the completed building. Together with Microsoft they have developed holographic software for the construction industry which produces an augmented reality right in front the operator's eyes using a Microsoft HoloLens. The augmented reality is based on the BIM-model. In this augmented reality, an operator can walk around the BIM-model and the model stays completely still, no matter how much the operator moves. The HoloLens is also certified for protective eyewear which makes it suitable for usage on construction sites. The Swedish market is very conservative, but some companies such as Smederna AB, which was also interviewed for this thesis, are ahead with their work with BIM. One of the biggest challenges with BIM and automation is, according to Trimble, the dynamic environment that the construction industry works in. Benefits with robots are that they can help with some heavy lifting tasks. In the future BIM will be able to communicate between external program and sensors with real-time data.

4.5.4 Company A (Designs buildings with BIM)

Company A designs buildings to several contractors and use the BIM program Revit from Autodesk to create a digital model. Challenges that Company A needs to handle are which details must be in the digital model since some can be difficult to create in the digital model. The communication between Company A and their customers is often demanding since it is hard to know what the customer desires. A major challenge is that the contractor usually starts the construction before Company A is finished with the digital model. The digital model that Company A creates is not used by any contractor since they only require paper

drawings. Company A also use BIM to extract coordinates for piles which can be generated for all piles in a table.

4.5.5 Build-r

Build-r is developing a mobile industrial robot for mounting drywalls at construction sites. The reason for selecting this specific work task is that it is heavy work and it is used frequently. The robot which is a IRB 4600 from ABB will lift the drywalls with a vacuum tool and place it against the wall and screw it into the stud with an electric screwdriver. This particular screwdriver is used in other industrial settings and was chosen because of its high screw capacity and for its reliability. The robot takes a new drywall sheet and mounts it next to the first one. The robot will be mounted on a mobile platform which will consists of all the parts necessary to mount the drywalls. The platform will be driven by omni directional wheels which makes the platform able to drive in sideways in all directions. The compressor for the vacuum tool will also be mounted on the platform along computers and batteries. The robot has a cameras and laser scanners for navigation and stud finding. A full-scale prototype of the drywall robot is currently being developed and will be tested at a construction site in the summer of 2018. A goal that Build-r has is that the robot that they are developing can be operational during the night 24 hours per day. Build-r is working with ABB and the construction company NCC and they are receiving funds from Smart Built Environment. Challenges for Build-r was to design the mobile platform so that is stable since industrial robots are heavy. In *figure 2* a CAD model of Build-r's drywall installation robot is shown.



Figure 2: Build-r drywall installation robot

4.5.6 FANUC

FANUC is a manufacturer of industrial robots. FANUCs robots have vision integrated into this controller which makes vision easy and more affordable to install as an add-in. A picture can be taken from above to aid the robot to find tools and material which works as a guide for the robot. When the material and tools are placed it is not necessary to place them exactly as in the picture, the robot will find them anyway with high guidance. FANUCs robots are connected to a global network where they share and learn different tasks from each other. A few years ago, Fanuc produced around 5000 robots per year and now their goal is to produce 11000 robots per year due to increased demand. In Sweden Fanuc has in two years

doubled their sales. Collaborative robots are increasing in sales since it is possible for human to work together with them. These robots must be bolted into the ground because the collaborative function does not work if they are mobile. Collaborative robots do not have as high speed as regular ones. Challenges in automation according to Fanuc is safety which is a large part. Challenges on a construction site could be the environment such as the cold which can cause problems for the electronics in their industrial robots. In order for automation on a construction site to be successful the installation should be smooth and self-adjusting with calibrations procedures and fit inside a container. To make the end-user satisfied it should be simple to use, program and calibrate and it is important to include the end-user when discussing automation.

4.5.7 byBrick Interface AB

byBrick Interface are into augmented reality, augmented reality, mixed reality and more, they have large knowledge about making different programs communicate with each other. They use BIM for real-estate and are working together with a real-estate firm to create a virtual reality for customers to see and walk around in before the building is complete and before the construction begins. byBrick technology can reduce adjustments in the future by walking around inside a virtual building in the project planning phase. byBrick Interface receives 3D-data from their customers, which can be in BIM, 3DsMax etc, depending on what type of information should be shown in the virtual world. The 3D-data contains large amount of unnecessary data that must be reduced in order to run smoothly. byBrick Interface believes that Microsoft's HoloLens technology is old even though it has not been publicly released in Sweden because of the fast technology development in augmented and virtual reality. byBrick Interface believes that the technology for controlling robots with machine vision is available. A large challenge with robots is people's attitudes towards robots such as the mind-set that robots are taking our jobs.

4.5.8 Smederna AB

Smederna build steel constructions and use BIM for automating some of their production. The key to Smedernas success is that they have spent a lot their resources in designing the steel construction with effective and simple solutions. Since a lot of work is made in advance the assembly is quick and no need to rework anything. Their goal is to spend more time in the beginning phase and design everything in detail. Every part in the construction, large and small, have a unique number that have a specific location in the constructions in which they are to be used. When the construction elements are to be assembled all the holes are predrilled, all the beams are cut to the exact lengths within accepted tolerances, and there are premade markings for weld placements. Smederna says that their success comes from more than just automation, where they give most credit to their way of focusing a lot of work hours on the processes before the physical processing of the incoming material. This means that their drawings and work instructions are very well thought out as to avoid confusion and mistakes in later processes, such as physical handling and machining in the workshop, be it manual or automated. Smederna says that the work tasks which includes handling of heavy materials and the tasks which are time demanding are the tasks worth automating. Their ambition is also to stray from using regular paper drawings and move to using 3D models and drawings on handheld electronic devices, on which the entire BIM model can be referred to and explored in real time, further avoiding misinterpretations and eliminate the need for massive storages of physical paper sheets. When working with steel Smederna needs tolerances of one millimeter.

4.5.9 Company B (Wall prefabricator)

In the production at this prefabricator the level of automation was zero and the reason was that production of walls had a high variety of dimensions only a few walls where the same. The prefabricator has their focus on smart solutions instead of automation since automation have a high investment cost and the uncertainty of success. In their production, they produced different kind of walls such as sandwich walls which is the main focus in this report. The Sandwich walls consists of concrete on the outside, cellular plastic on the inside, rebars in different dimensions, a wire for lifting the wall, plastic pipes at the bottom for attaching the wall to the concrete foundation and sometimes electric cables. This prefabricator had several different concrete-mixes and all was tested before a wall was cast. A problem that sometimes occurred with the concrete-mix was that it become viscous which made it hard to flow out of the overhead concrete dispenser. There is some heavy lifting with the rebars and the posture was not ergonomic when lashing together the rebars.

4.5.10 Company C (Prefabricator of villas)

This prefabricator builds villas and have a low volume and high variation product mix. All villas are uniquely built since they are designed by the prefabricator together with the customer. The walls and trusses are assembled manually on large tables that are placed horizontally and when one side is complete the wall and truss are turned with the help of a bridge crane for the completion of the other side. Some wooden parts are precut in a semiautomatic saw machine before they are used in the assembly. The wooden parts are loaded into the machine manually, one by one. The machine saw the part in specific lengths and angles and are unloaded manually and placed together with all the wooden parts for the specific villa. The machine receives the dimensions and cutting information from BIM. The saw machine was implemented in 2016 for the purpose of reducing the heavy work task in lifting up the saw blade for every cut which was repetitive and not ergonomic. The personnel are open to implementing aid that ease the measuring and assembly task but persist that fully automatic solutions could reduce their high quality and difficult to implement. At this prefabricator, the tolerances usually lie within five millimeters, but around window the tolerances need to be narrower, within one millimeter.

4.5.11 Summary of the results from the interview study

A summary of the results from the interview study can be seen in *Table 4*. Due to the companies' different business areas, all companies could not or did not have the knowledge to answer all questions.

Table 4: Summary of the result from the interview study

Company	Key area of business	Possible to automate in construction	Automation challenges in construction	Automation benefits in construction
Unibap AB	Developing vision and artificial intelligence for robotics in manufacturing industries and space applications	Finding materials and coordinates	Large development resources and preconception about automation	Flexibility, higher accuracy
ABB Robotics	Manufacturing industrial robots	Industrial robots have become more flexible due to collaborative robots which enables more work tasks to be automated	Safety, electric cables, financial, short product cycle, digitalization, low volume and many change overs	Becomes cheaper every year, flexibility
Trimble Solutions Sweden AB	Selling and developing BIM program.	-	Dynamic environment	Reduce heavy lifting for humans
Company A	Project planning consulting, focus on constructing BIM models	-	Paper drawings, not utilizing a digital model	-
Build-r AB	Automation in construction	Heavy lifting, screwing, stud finding and transporting material	High weight of industrial robots	Operational all day and night, reduce heavy lifting and repetitive tasks
FANUC Nordic AB	Manufacturing industrial robots	Work tasks that requires locating for example materials with the help of a vision system	Safety, environmental factor such as cold	Flexibility
byBrick Interface AB	Developing cross reality interfaces for marketing and industries	-	Preconception about industrial robots	-
Smederna Sverige AB	BIM, design, automation	-	-	High accuracy, less rework, reduce heavy lifting, less storage of physical papers
Company B	Building prefabricated walls	-	Uncertainty of success and high investment cost	-
Company C	Building complete villas, focus on prefabrication	Cutting wood	Lower quality and difficult to implement	Reducing heavy repetitive work tasks

4.6 Conferences

Two conferences were attended and both of them were about digitalization. The following two subsections reports the findings from these conferences.

4.6.1 Utblick med BIM Alliance 2018

The conference *Utblick med BIM Alliance 2018* was about digitalization in the construction industry and expert in different fields were invited to speak. There was a general consensus that the construction industry is behind the manufacturing industry in many ways, lacks data, the buildings does not become as-built, there is low standardization, slow innovation rate and a low utilization of digital tools. All the companies that spoke agrees that the construction industry have potential and could be better in utilizing available technology to increase productivity, reduce errors, making the building as-built and utilize BIM, AI and other digital tools through the entire supply chain. The conference goal was to mediate how the construction industry can become digital through different tools, methods and collaboration. Companies and the subject of which spoke of can be seen in *Table 5*.

Table 5: Utblick med BIM Alliance Conference Speakers

Company	Subject
Formas	National investment on digitalization in community building from an innovation and research perspective
AI consultant	Opportunities with AI
Alimak Group	Digitalization and innovation
Maestro Design & Management	Manufacturing and design in world class
Datscha	Proptech and BIM
ESS	Product lifecycle management
Tikab	True digital model based construction documents deliveries – the project Slussen
Skanska	Digital tools in production
Akademiska Hus, Zynka BIM	From real-estate data to new business opportunities
Tyréns	Parametric design and productization
Linköpings University	Connecting the construction sites
Svensk Betong and Skanska	Lifecycle perspective
Linköping University	Master's degree in BIM
Plan B	National guidelines for BIM
Serneke	How to drive changes in organizations with the effects of digitalization

4.6.2 ABB Automation Scandinavia 2018

The ABBs *Automation Scandinavia 2018* conference was about digitalization and how digital technologies can be used to increase quality, availability and productivity. In the manufacturing industry the digitalization is generally on a high level and this conference was how companies can become even more digital through the use of new tools that are available, AI and collaboration between different companies. The manufacturing industry is becoming more automated since industrial robots have become more flexible and collaborative and the potential to increase the level of automation is extremely high.

Table 6: ABB Automation Scandinavia 2018 speakers and subjects

Title	Company	Subject
Chief Digital Officer	ABB Group	How ABB can make your company more successful
Project leader	Mälarenergi	Mälarenergi's digital strategy journey to "the city's control room"
Division manager	Borås Energi och Miljö	A hyper modern control room
Professor in computer science	KTH	AI and robotics – state of the art and challenges
Chief Automation Officer	Northvolt AB	Northvolt builds Europe's largest factory for lithium batteries
Digital Lead	ABB Sweden	Collaboration, speed and innovation increase the rate in the digital transformation
Sales manager and CEO	Sales manager Robotics and B&R Sweden	Journey to the future manufacturing industry

This page is intentionally left blank

5 ANALYSIS

In this chapter, the three research questions are analyzed and the example concept case, built upon existing technologies, is described.

5.1 Research Question 1 – What Is Possible to Automate on the Construction Site with Today’s Technologies?

With today’s technology automating processes in the construction industry have been done in numerous ways in several parts of the world. Generally, monotonous and repetitive tasks are the most suited tasks for automation implementations, as supported by Chu et al. (2013), Build-r (2018), Panda et al. (2017) and Usmanov et al. (2017). ABB claims that with the introduction with collaborative robots, automation becomes more flexible and more business areas can be automated. Today there are few areas which cannot be automated according to the company Unibap and ABB Robotics, which claims that automation possibilities are more of a financial question than technical possibilities. The construction industry has a slow innovation rate (Bock 2015; Bogue 2018; Wu et al. 2016). There are however several ways that the construction industry is utilizing new technologies such as drones which 61 % of the construction industry uses in the U.S according to Tatum & Liu (2017) and 12 % in the U.K according to Bouge, (2018). Skanska begun to use augmented reality in some projects and looking into a full scale automated rebar station.

The examples of successful automation in the construction industry and upcoming are plenty; the companies Fastbrick and Construction Robotics have automated bricklaying in the construction industry on-site and research of robotized bricklaying is done by Usmanov et al., (2017). The company MX3D are currently constructing a steel bridge in Amsterdam through additive manufacturing in a factory, Gosselin et al., (2016) used an industrial robot to 3D print concrete, Labonnote et al., (2016) research shows that 3D printing can be implemented for large-scale structures. According to Anna Kochan (2000) have Stefan Moser developed an automatic manipulator for spraying concrete on to a surface. ETH Zürich are building a house, called DFAB House, with different types of automated processes where García de Soto et al., (2018) used an industrial robot to build a complex concrete wall. Komatsu are developing autonomous construction vehicles for use on-site and research of autonomous vehicles and robots guided by vision system are done by Lundeen et al., (2017), Feng et al., (2015), Chu et al., (2013), Almayyahi et al., (2017). The company Unibap have developed a vision system to guide and make robots more flexible. The company Odico are using robots for cutting complex shapes and Usmanov et al., (2017) use an industrial robot to cut bricks. The company Smederna has automated their steel beam manufacturing processes with the help of BIM where Chu et al., (2013) have developed a robotic beam assembly system for on-site. The company nLink draws information from BIM to drill holes with a robot on-site and the company Build-r are using a robot to install drywalls on-site. Both Teizer et al., (2017) and Kochovski & Stankovski, (2018) researched in collect real-time data utilizing IoT devices in the construction industry.

Robot systems have become more advanced which makes them able to work in unstructured environments and in several diverse fields (Bock, 2015). Based on research, the current state-of-the-art implementations of automation in the construction industries and the interviews conducted for this report, it is possible to automate countless work tasks in construction such as drilling, bricklaying, autonomous guiding of construction vehicles and

robots, 3D printing of steel, cutting, drywall mounting, spraying concrete, additive manufacture of steel walls and timber assembly. Tasks which are advantageous for automating are those that are monotonous, repetitive and entails poor worker ergonomics.

In the concept case when building sandwich walls a worker performs several tasks which are lifting, sawing, cutting, bending, spraying concrete and scraping with the tools: saw, brick trowel, finishing trowel, cutting plier and a rebar tie tool. For implementing automation on-site using industrial robots to build sandwich walls, which is rather complex, it is recommended by Davies, (2012) that a vision system should be installed. The industrial robot must also be able to move around on-site. Digital information will be utilized from the BIM model.

In order to get a better overview of what is possible to automate on-site with today's technology, with the concept case as an example, the theory and empirical results are summarized in *Table 7*.

Table 7: Concept case, potential robot tasks and corresponding theories and empirics

Concept case: Possible robot tasks and digital technologies	Corresponding Theories	Corresponding Empirics
Lifting and placing	(García de Soto et al., 2018), (Usmanov et al., 2017)	Build-r, FANUC, ABB Robotics, ETH Zürich, Fastbrick, Construction Robotics
Cutting	(Usmanov et al., 2017)	Odico
Lashing	<i>Not found</i>	Robotic Rebar Station (Skanska and Robotdalen)
Spraying concrete	(Wu et al., 2016), (Gosselin et al., 2016), (Anna Kochan, 2000), (Labonnote et al., 2016), (García de Soto et al., 2018)	ETH Zürich
Scraping	(Usmanov et al., 2017)	<i>Not found</i>
Finding materials and coordinates	(Lundeen et al., 2017), (Feng et al., 2015), (Chu et al., 2013), (Usmanov et al., 2017)	Unibap, FANUC
Movability	(García de Soto et al., 2018), (Almayyahi et al., 2017)	Komatsu, Build-r, Unibap
Utilizing BIM	(Lundeen et al., 2017), (Usmanov et al., 2017)	<i>Smederna</i> ,

Sawing and cutting could possibly be removed from the work tasks since the polystyrene blocks are smaller than the traditional polystyrene plates which will be illustrated in section 5.5.7.

5.2 Research Question 2 – What Are the Benefits of Automation on the Construction Site?

There are several benefits with automation such as increased safety according to Sharma, (2011) and Lundeen, (2017) said that industrial robots could increase safety in the construction industry which is agreed by the companies Fastbrick, Komatsu, Construction Robotics and according to Frohm et al., (2006) could be due to the fact that operators are kept out of the automation system and thereby are humans protected. Safety could also be increased by using IoT devices according to Kochovski & Stankovski, (2018). Higher productivity in automation could be due to the fact that automation often leads to faster results according to Sharma (2011), shorten project lead time according to Lundeen, (2017), García de Soto et al. (2018) found that automation led to higher productivity when building complex walls. Robots can work around the clock without a break and can be used for repetitive and heavy lifting tasks which increases ergonomics for workers, according to Usmanov et al. (2017). The following companies all agree in some way that productivity is increased by robotics and automation, Fastbrick, nLink, Build-r, ETH Zürich, Komatsu, Construction Robotics, Odico and Smederna AB. Both Sharma, (2011), Lundeen (2017), Frohm et al. (2006), Chu et al. (2013) agree that quality is an aspect that will increase with automation. Both nLink's drilling robot and Fastbricks bricklaying robot increase accuracy which yields a higher quality which is also concurred by the company Unibap. According to Bonev et al. (2015), methods and concepts from the automotive industry have for some time tried to be implemented into research in construction to reach higher productivity.

The use of IIoT can find and correct problems faster than humans which saves time and money (Buyya & Dastjerdi, 2016). According to Tomita et al. (2017) UAV can be used for automated measurements, of satisfactory accuracy, which is less time consuming and presents less risk of injury for workers. Industrial robots are vital to increase the level of flexibility and automation in modern production system (Bolmsjö, 2006). Automation in the construction industry has the potential to return substantial operational, environmental and economic benefits (Bouge, 2018). According to Eastman (2008) utilizing BIM in the construction industry has major advantages such as reduce conflicts and errors and the planning process becomes smoother. According to Company E, benefits with robots are that they can help with some heavy lifting tasks. According to Skanska, building rebar cages manually on-site is heavy and not ergonomic and is therefore an optimal work task to automate in the construction industry.

Reasons for the increase of productivity in manufacturing could be due to the benefits from automation. As identified by Frohm et al. (2006), benefits from automation in manufacturing are efficiency improvements, cost reductions and enhanced competitiveness and productivity.

5.3 Research Question 3 – What are the challenges for implementing automation on the construction site?

Several researchers claim that the construction industry have a low innovation rate both Bock, (2015), Bogue (2018) and Wu et al. (2016). This low innovation rate could be because of a low research and development according to Bock, (2015), Smith & Tardif, (2009) adds that the worldwide construction industry has achieved little in technological advancement. Implementation of industrial robots in the construction is challenging due to high variety of tasks performed and are encircled by disorganized materials (Chu, et al., 2013; Papaioannou et al. 2017). The challenge of a dynamic environment is confirmed by ABB Robotics and the challenge of high variety of tasks is confirmed by Trimble Solutions Sweden AB.

Digital technology provides data for automated manufacturing technologies (Eastman et al., 2008). One of the biggest challenges with BIM and automation is, according to Trimble Solutions Sweden AB, the dynamic environment that the construction industry works in. According to Skanska BIM is mainly used for winning building contracts and construction companies have to fight for contracts in a design-bid-build method. According to (Eastman et al., 2008) is the design-bid-build method a challenge since valuable collaboration cannot start before a contract is won. Safety is one main challenge in automation and it is confirmed by the companies FANUC and ABB Robotics.

When a building is complete it is based on the digital model and there are many modifications in the actual building which means that the digital and the actual building will have variations, meaning that an important part of the digital model is lost. This is confirmed by Company A which state that the digital model they create will not be as-built when the construction is complete. According to Albinsson (2018), new technologies that will arise to the construction sites that cannot be fully implemented today since there is a lack of drawing documentations and digital substrates.

Smederna follows their BIM model fully but they emphasis allocating resources to the beginning of the project so that the steel construction can be assembled efficiently later. Build-r has challenges with integrating the various parts together and to design the mobile platform so that is stable since industrial robots are heavy. Main challenges today in the manufacturing industry according to ABB Robotics are short product cycles, digitalization, low volume and many change overs. In the past, flexibility was a challenge according to Bolmsjö, (2006). All companies are, according to ABB Robotics, calculating the return on investment (ROI) of automation which means that it is an important measurement for the planning of automation investments. One challenge with mobile robots and machine is electric cables according to ABB Robotics. Challenges according to the company Unibap are the requirement of large development resources and preconceptions about automation. byBrick Interface also emphasizes preconceptions about automation where it is not uncommon for it to be seen as a means to replace workers, which creates an opposition against automation. Autor (2015) mentions that the types of jobs available, as well as what they pay, indeed changes due to automation. However, Autor (2015) also stresses that, in the past two centuries, human labor has not been made obsolete by automation or technological advancements, even though automation is typically intended to substitute for labor. One of the reasons is that it also complements labor and foster higher demand for labor through increased production outputs.

The global analysis of the state-of-the-art implementations did not provide any challenges in their implementations, these companies only provided benefits. Therefore, no analysis can be drawn from challenges these companies might have been presented to.

5.4 Automation Concept Case

In this chapter, a concept case is presented in the purpose to examine what kind of technologies can be used to achieve the building of four sandwich walls on-site. These walls are utilizing a zigzag rebar technique in prefabricated blocks of polystyrene which, after the assembly, has rebar nets mounted on them and then gets sprayed with concrete on both sides of the wall.

5.4.1 Requirements

For this case, the concrete foundation for the villa is a prerequisite and is assumed to exist prior to the implementation of automation for this suggested case. Regarding materials, it is a prerequisite that they are pre-cut and supplied at the correct locations on-site, ready to be used for construction by the robots. In this case, the robots are not meant to be performing their tasks in real time collaborations with humans, due to the complex nature of such installments, it is therefore a requirement that no human workers enter the perimeter of the work site while robots and machines are operating.

5.4.2 Industrial robot

Build-r are in collaboration with ABB and selected an IRB 4600 for their operation since it has the capacity to lift drywalls, the reach is long enough, and their mobile platform can handle the weight of the robot. Build-r made a reasonable selection since selection of an industrial robot that have a low weight, long reach and a high payload is limited, therefore tradeoffs must be made. FANUC has a similar robot with regards to weight, reach and payload. The selection of an industrial robot to the concept case would be the IRB 4600 since it weighs less than M-710iC/45M.

5.4.3 Machine vision

According to Davies (2012) a vision system should be installed for complex task that will be carried out by a machine. The construction site is an ever-changing environment and few work tasks are identically performed at each occasion (Vähä, et al., 2013). Unibap's vision system could be used for guiding the robot on-site since it is an everchanging environment. For the concept case Unibap's vision system would be selected since their system is self-calibrating and has a very high accuracy, which is important for success according to FANUC.

5.4.4 BIM

BIM has information about spatial relationships, geographical information, geometry, properties of building components, quantities etc. (Vähä, et al., 2013). Advantages with BIM is reduced project duration, lower cost and better-quality buildings (Eastman, et al., 2008). The research of BIM is growing and there is a rapid adoption and development in BIM technologies (Zou, et al., 2017). Unibap are developing a plug-in for the CAD program Solidworks and will develop a plug-in for Catia and Creo later. Perhaps it could be possible to develop a plug-in for BIM as well. BIM contains all the relevant information of a building, have several advantages and substantial research and adoption, is therefore the logical choice for the digital substrate in the concept case.

5.4.5 Mobile Platform

In order for the industrial robot to be able to move around a construction site it must be mounted onto a mobile platform, rails, gantry or portal. For our concept case, a mobile platform is selected because it needs no installation and it is easier to transport. Build-r will use a mobile platform with omni directional wheels, but the proposed concept will be working both inside and outside on-site with makes caterpillar treads a better choice. Alitrak DCT-450 is one mobile platform that could be selected to our concept, but one main disadvantage is the loading capacity at 450 kg since industrial robots generally has a low lifting capacity to weight ratio, which makes them very heavy. A lighter industrial robot could be mounted onto this platform for the purpose of performing a task that does not require such a high lifting capacity. However, a platform that supports a higher loading capacity for a heavier robot is needed since lifting a rebar net requires longer reach and higher lifting capacity. Selection of an existing platform that supports a heavier weight has not been, because a perfect fit could not be found. Instead, a mock up platform was modelled.

5.4.6 Execution

Materials could be placed outside or inside of the building in approximate places and with the help of the vision system the material can be located. Appropriate tools will be mounted on the robot and should be able to be switched by the robot, if necessary. There could be several robots in different sizes that performs different tasks and collaborates when necessary. Lifting and placing the polystyrene could be performed by a small or a large robot depending on the weight and size of these. Perhaps lifting a large heavy rebar net could be done in collaboration by two small robots instead of one large. Attaching the rebar with the polystyrene could be done by a large or small robot. Spraying concrete and the scraping of the walls for the last finish should be executed by a large one since a long reach could be vital.

5.4.7 Solidworks Layout

Below is the proposed example of a robotic construction case, modelled and rendered using Solidworks 2017-18. In the rendition, the robots are outfitted with Unibap's Intelligent Vision System 70 (IVS-70). The placement of the IVS-70 is likely to be changed to achieve optimal functionality. Additional renditions can be found in appendix.

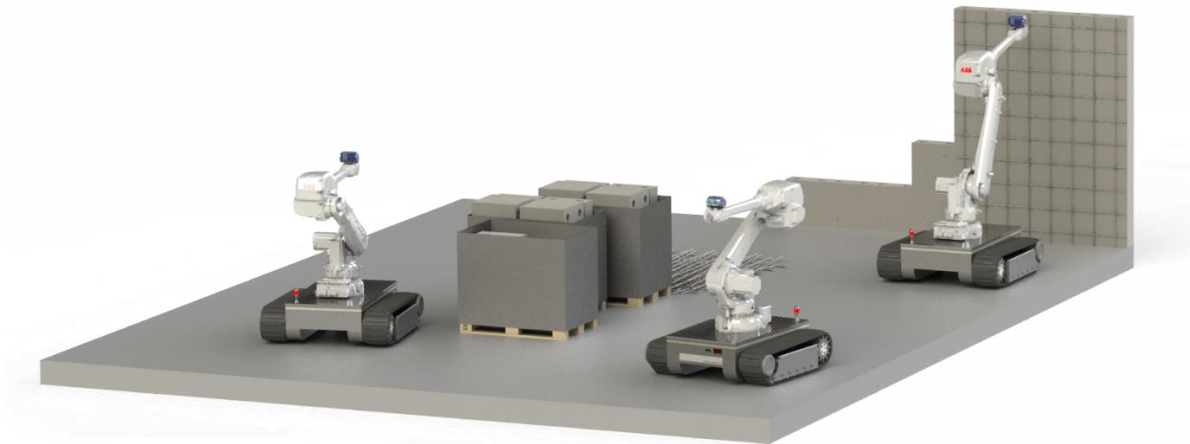


Figure 3: Example of an on-site robotic construction layout

5.4.8 Safety

Safety is one of the greatest challenges with automation according to several companies in this report and should not be taken lightly. The industrial robot will perform its tasks without human intervention while operating. Safety devices such as scanners or sensor plates could be set up so that when a human enters the robot working area it will instantly come to a stop. Humans could oversee the robot from a safe distance and provide supplements and support when needed.

5.4.9 Automation concept regarding the RQs

As a synthesis of the data collected for this thesis, the automation concept represents a possible near-future implementation of robotic on-site construction. The concept's feasibility is supported by findings from the data collections conducted by the authors, where work tasks, similar to those in the concept, have been successfully automated in other settings, such as lifting, cutting and drilling. While it therefore can be considered a possible implementation, there are still challenges to acknowledge. As the data also suggests, the construction sites are far from isolated laboratory environments, implying that the concept requires advanced digital technology in order to function as intended. This is because the robots and their equipment will be subject to both changing weather conditions and changing work conditions with uncleanness, such as dirt, and most likely scattered building material in assorted sizes. This, in addition to the fact that some of the building material is imprecise, compared to the often submillimeter tolerances of the manufacturing industry, leads to the need for self-adjusting and self-calibrating machines. This challenge can be tackled with the use of digital databases together with BIM and

vision systems, such as Unibap's. Another challenge is that there are currently not any construction robots established on the market, which limits the choices of suitable robots capable of performing heavy lifting while still being mobile enough to move about the typical construction site. In this case ABB's robot IRB 4600 were chosen to illustrate the robotic application. With an automation implementation such as this, there are several possible benefits which can be gained. As discovered through the data collection, the potentials of automation are indeed many, such as productivity increases, cost reductions and increased worker safety, where the automation solutions should do the heavy lifting and strenuous tasks so that the workers do not have to.

6 DISCUSSION AND CONCLUSIONS

The purpose of this report is to investigate technologies that could be used to automate on-site construction operations via the use of digital technologies. Both small start-up companies and huge companies from many corners of the world are looking to automation to increase production and safety in the construction industries. The world of automation has grown rapidly for the last four decades as computers are constantly becoming more advanced and versatile which enables for more and more work tasks to be automated. In recent years more and more, automated solutions have been implemented in our society such as self-driving cars, trucks and heavy vehicles, AGVs, UAVs and more.

The construction on-site is a highly dynamic environment according to Papaioannou et al., (2017) which have made automated solutions problematic. However, in recent years, sensors, vision and other new technologies are enabling robots to be more versatile and safer to implement in the construction industry. There are robots available that are fenceless and safe to work together with humans that are not confined in one single place.

Many companies have begun to collaborate with different companies from other business areas, resulting in mutual benefits. Collaboration between companies that are specialized in different business areas are seen as a key to success by many and there are several examples of collaboration in this report. According to Kochovski & Stankovski, (2018) IoT can be used to support collaboration in the construction industry. Adopting BIM can enable close collaboration with construction and design teams (Eastman et al., 2008; Krygiel & Nies, 2008). Collaboration is seen as an aspect that can improve productivity in the construction industry. Close collaboration of construction and design teams is possible when adopting BIM, which will make construction deliveries more reliable, less costly, reduces errors and enables faster processes. (Fulford & Standing, 2014). Skanska have begun to collaborate with ABB, Volvo CE, Robotdalen, Trimble and is funding the research project ARRAY. Other companies that are in collaboration are: Fastbrick and Caterpillar, which have signed a MOU, Build-r are collaborating with their innovation together with ABB and NCC, MX3D are in collaboration with several companies, ETH Zürich are collaborating with numerous companies to build the DFAB House, Komatsu have signed partnership with NVIDIA for making construction vehicles autonomous.

The manufacturing industry have had several automation challenges in the past which has been overcome through the use of technology and information. The construction industry could possibly face the same, or similar, challenges but they have the chance to learn from history which could ease difficulty of the implementation of automation. In many manufacturing plants the production can run 24 hours per day and 365 days per year. In the construction industry in Sweden, of the 24-hour available the construction projects are only active in two-thirds of these. Build-r's vision is to increase production in the construction industry by utilizing the night shift since there are no operations done at this time.

The industrial robots are heavy and have a low lifting capacity compared to its own weight. In the construction industry an industrial robot has working condition of loose tolerances, imperfect measurement and large workpiece uncertainties (Lundeen, et al., 2017). The reason behind the high weight is because the robot is required to work fast and accurate in manufacturing. The construction industry does not require as high accuracy as the manufacturing industry since working with wood the tolerances that are necessary are one to five millimeters and with steel about one millimeter. In the manufacturing industries, the

industrial robots do many repetitive tasks for many thousands of products which require speed. This lowered accuracy requirement could be paired with a vision system to make sure that the robot compensates for already installed elements.

A dedicated construction robot (CR) should be able to have a reduced weight if adjusted solely for the construction industry since precision and speed can be slightly reduced. A CR must be able to move around in an unstructured environment both inside and outside which sets requirements on the weight. A CR should perform several work tasks instead of many repetitive such in the manufacturing industry. A CR must be built to withstand the harsh environment inside and outside of the building. nLink have combined an industrial robot with hydraulics with a scissor lift which reduced the need for a large and heavy robot that could drill the holes. Based on how different companies have previously handled the issue of movability of a robot in the construction industry, with respect to the fact that it is an everchanging environment and variable terrain, a mobile platform has been a choice by many. This is because it that can handle variations in the terrain, rain and dust but also be stable when the robot is moving. Stabilizers that unfolds when the platform is stationary could increase stability if a heavy industrial robot is mounted into the mobile platform.

It is a vital aspect to begin to use BIM as a live model since it can be used for a basis in automation tasks and also for digitalization of the construction site. The Microsoft HoloLens can already be used in the construction industry as an aid for construction workers on-site, which is possible by the use of BIM. Furthering the usages of BIM more extensively throughout the construction industries could have huge benefits in the future when automating work tasks with the help of BIM is implemented.

There is much to gain from automating work tasks on the construction site. Productivity and safety aspects are one good motive to develop automation solutions which can be implemented at a construction site, since it has the potential to increase speed, lower the occurrence of accidents and also to free the workers from repetitive and strenuous work tasks. In addition to the safety concerns at a typical construction site, manual labor, in contrast to automation, also leads to inexact results, unnecessary waste of build material and long lead times for the completion of tasks. These are all problems that can be tackled using automation, provided that the technologies needed for implementing such solutions is accessible.

RQ 1 – What is possible to automate on the construction site with existing technologies?

Companies in this report have utilized industrial robots and machines to automate operations in the construction industry. Some of these companies are in the beginning stage, some are in the testing stage and others are implemented at various stages in the construction industry. It is possible to automate numerous work task in the construction industry since industrial robots have become more flexible and vision system have become more advanced.

It is possible to automate task that are installation of drywalls, drilling, cutting, spraying of concrete, timber assembly, bricklaying, additive manufacturing of steel walls and autonomous guiding of vehicles. Generally, monotonous and repetitive task are the work task that should be automated first.

RQ 2 – What are the benefits of automation on the construction site?

Automation in the construction industry have been implemented by several companies in different ways and at various stages and benefits that will come from these solutions are, higher production, increased safety, lower costs, better accuracy, fewer errors, faster completion and better ergonomics.

RQ 3 – What are the challenges for implementing automation on the construction site?

Challenges for implementing automation on the construction site are several and could experience the same challenges that the manufacturing industry had in the past which is a great opportunity to learn how they tackled those challenges. Challenges that are facing the construction industry today are a dynamic and ever-changing environment, low research and development budget, reluctance in new strategies, safety, preconception about automation, allocating more resources in the start of the project, continuous updating of the digital model and safety, the design-bid-build method that hinders collaboration.

Thesis Purpose

In this thesis, several existing and emerging automation solutions for automating on-site construction operations, with the use of digital technologies, has been reported. The three research questions have been answered where this thesis describes the possibilities, benefits and challenges with automation. To reach this goal, the authors sought data through literature, interviews, global analysis and conference attendances, which all gave similar results, pointing towards a future with possibilities for increased automation, bringing forth important benefits. Key enablers for this to happen is increased collaboration between companies and members of the operations' supply chains, as well as an increased level of digitalization.

Future Research

This thesis evaluates the current level of digitalization and automation in the construction industry, but not how to increase those aspects. Therefore, important topics for future research could be regarding how to best increase the digitalization and automation levels in the construction industry. Further research could also be about how to standardize digital methods to increase co-operability between construction companies and their involved parties, since collaboration often proves to be a great strategy for rapid development. Lastly, research regarding the development of automation equipment tailor-made for the construction industry would most likely be of great benefit, and enabler, for reaching increased automation levels. Research on integrating hydraulics on industrial robots in creating a CR could be of interest for the axis with the highest torque to reduce the weight, the speed and accuracy could be compensated by the other axis.

7 REFERENCES

- Albinsson, L., 2018. *BIM Alliance 2018*. Stockholm: Maestro Design & Management.
- Almayyahi, A., Wang, W., Hussein, A. & Birch, P., 2017. Motion control design for unmanned ground vehicle in dynamic environment using intelligent controller. *International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics*, 10(4), pp. 530-548.
- Autor, D. H., 2015. Why Are There Still So Many Jobs? The History and Future of Workplace Automation. *Journal of Economic Perspectives*, 29(3), pp. 3-30.
- Barker, G. et al., 2004. *Improving health and safety in the construction industry*, London: National Audit Office.
- Bellgran, M., Bruch, J. & Javadi, S., 2016. Characteristics of product introduction process in low-volume manufacturing industries: A case study. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 27(4), pp. 535-559.
- Bock, T., 2015. The future of construction automation: Technological disruption and the upcoming ubiquity of robotics. *Automation in Construction*, Volume 59, pp. 13-121.
- Bolmsjö, G. S., 2006. *Industriell Robotteknik*. 3:4 ed. Lund: Studentlitteratur AB.
- Bonev, M., Wörösch, M. & Hvam, L., 2015. Utilizing platforms in industrialized construction: A case study of a precast manufacturer. *Construction Innovation*, 15(1), pp. 84-106.
- Bouge, R., 2018. What are the prospects for robots in the construction industry. *Industrial Robot: An International Journal*, 45(1), pp. 1-6.
- Buyya, R. & Dastjerdi, V., 2016. *Internet of Things: Principles and Paradigms*. Cambridge: Elsevier Inc.
- Carbone, G. & Gomez-Bravo, F., 2015. *Motion and Operation Planning of Robotic Systems*. New York: Springer Cham Heidelberg.
- Chen, H., Fang, Y. & Sun, N., 2017. A tower crane tracking control method with swing suppression. *Chinese Automation Congress*, pp. 3609-3614.
- Chu, B., Jung, K., Lim, M.-T. & Hong, D., 2013. Robot-based construction automation: An application to steel beam assembly (Part I). *Automation in Construction*, Volume 32, pp. 46-61.
- Dadhe, D., 2016. *Research Methodology*. 1st ed. s.l.:Archana Dadhe & Smashwords.
- Davies, E. R., 2012. *Computer and Machine Vision*. 4 ed. Waltham: Elsevier Science and Technology.
- Deng, Y., Hong, H., Deng, H. & Luo, H., 2017. BIM-based Indoor Positioning Technology Using a Monocular Camera. *ISARC*.
- Dupont, Q., Chua, D., Tashrif, A. & Abbott, E. L. S., 2017. Potential Applications of UAV along the Construction 's Value Chain. *Procedia Engineering*, 182(3), pp. 165-173.

- Dzeng, R. J., Hsueh, H. H. & Ho, C. W., 2017. Automated Posture Assessment for Construction Workers. *MIPRO*, Issue Maj 22-26, pp. 1027-1031.
- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R. & Liston, K., 2008. *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling*. New Jersey: John Wiley & Sons Inc.
- Fang, Y. & Cho, Y. K., 2017. Evaluation of Crane Operators' Performance and Situation Awareness during Lifting Operations. *34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2017)*, pp. 96-103.
- Feng, C. et al., 2015. Vision guided autonomous robotic assembly and as-built scanning on unstructured construction sites. *Automation in Construction*, Volume 59, pp. 128-138.
- Freimuth, H., Müller, J. & König, M., 2017. Simulating and Executing UAV-Assisted Inspections on Construction Sites. *The 34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*.
- Frohm, J., Lindström, V., Winroth, M. & Stahre, J., 2006. *THE INDUSTRY'S VIEW ON AUTOMATION IN MANUFACTURING*. s.l., IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline), pp. 453-458.
- Fulford, R. & Standing, C., 2014. Construction industry productivity and the potential for collaborative practice. *International Journal of Project Management*, Volume 32, pp. 315-326.
- Gagnon, Y.-C., 2010. *Case Study as Research Method: A Practical Handbook*. University of Quebec: Presses de l'Université du Québec, an imprint of Independent Publishers Group.
- García de Soto, B. et al., 2018. Productivity of digital fabrication in construction: Cost and time analysis of a robotically built wall. *Automation in Construction*, Volume 92, pp. 297-311.
- Georgakopoulos, D. et al., 2016. Internet of Things and Edge Cloud Computing Roadmap for Manufacturing. *IEEE Cloud Computing*, 3(4), pp. 66-73.
- Ghaffarianhoseini, A. et al., 2017. Building Information Modelling (BIM) uptake: Clear benefits, understanding its implementation, risks and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 75, pp. 1046-1053.
- Ghrayeb, O., Damodaran, P. & Vohra, P., 2011. Art of triangulation: an effective assessment validation strategy. *Global Journal of Engineering Education*, 13(3), pp. 96-101.
- Gosselin, C. et al., 2016. Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete – anew processing route for architects and builders. *Material and Design*, Volume 100, pp. 102-109.
- Hofmann, E. & Rusch, M., 2017. Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. *Computers in Industry*, Volume 89, pp. 23-34.
- Jina, J., Bhattacharya, A. K. & Walton, A. D., 1997. Applying lean principles for high product variety and low volumes: some issues and propositions. *Logistics Information Management*, 10(1), pp. 5-13.
- Kochan, A., 2000. Robots for automating construction - an abundance of research. *Industrial Robot: An International Journal*, 27(2), pp. 111-113.

- Kochovski, P. & Stankovski, V., 2018. Supporting smart construction with dependable edge computing infrastructures and applications. *Automation in Construction*, Volym 85, pp. 182-192.
- Kothari, C. R., 2004. *Research Methodology Methods & Techniques*. 2nd rev. Ed ed. New Delhi: New Age International.
- Krygiel, E. & Nies, B., 2008. *Green BIM Successful Sustainable Design with Building Information Modeling*. 1 ed. Indianapolis: Wiley Publishing Inc.
- Kumar, L. S., 2017. State of The Art-Intense Review on Artificial Intelligence Systems Application in Process Planning and Manufacturing. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Volume 65, pp. 294-329.
- Labonnote, N., Rønnquist, A., Manum, B. & Rüther, P., 2016. Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities. *Automation in Construction*, Volume 72, pp. 347-366.
- Liu, Y., Nederveen, S. v. & Hertogh, M., 2017. Understanding effects of BIM on collaborative design and construction: An empirical study in China. *International Journal of Project Management*, 35(4), pp. 686-698.
- Lundeen, K. M., Kamat, V. R., Menassa, C. C. & McGee, W., 2017. Scene understanding for adaptive manipulation in robotized construction work. *Automation in Construction*, Volume 82, pp. 16-30.
- Ma, G., Li, Z. & Wang, L., 2018. Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing. *Construction and Building Materials*, Volume 162, pp. 613-627.
- Mehta, B. R. & Reddy, Y. J., 2015. *Industrial Process Automation Systems: Design and Implementation*. 1 ed. Waltham: Elsevier Inc.
- Migilinskas, D., Popov, V., Juocevicius, V. & Ustinovichius, L., 2013. *The Benefits, Obstacles and Problems of Practical BIM Implementation*. Vilnius, Lithuania, Elsevier Ltd., pp. 767-774.
- Miles, M. B. & Huberman, A. M., 1994. *Qualitative Data Analysis: An Expanded Sourcebook*. 2nd ed. London & New Delhi: SAGE Publications.
- Neges, M. et al., 2017. Improving Indoor Location Tracking Quality for Construction and Facility Management. *34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, ISARC 2017*, pp. 88-95.
- Ochoa, S. & Fortino, G. D., 2017. Cyber-physical systems, internet of things and big data. *Future Generation Computer Systems*, Volume 75, pp. 82-84.
- Oesterreich, T. D. & Teuteberg, F., 2016. Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry. *Computers in Industry*, Volume 83, pp. 121-139.
- Panda, B. et al., 2017. Automation of robotic concrete printing using feedback control system. *ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, Volume 34, pp. 1-5.
- Papaioannou, S., Markham, A. & Trigoni, N., 2017. Tracking People in Highly Dynamic Industrial Environments. *IEEE Transactions on mobile computing*, 16(8), pp. 2351-2365.

- Poh, C. Q., Ubeynarayana, C. U. & Goh, Y. M., 2018. Safety leading indicators for construction sites: A machine learning approach. *Automation in Construction*.
- Rahm, G. H., 1988. *ROBOTS IN THE SWEDISH CONSTRUCTION INDUSTRY*. Tokyo, s.n., pp. 47-50.
- Richards, M., 1994. Automation in construction software systems lay the foundations. *Industrial Robot: An International Journal*, 21(4), pp. 26-28.
- Saunders, M., Lewis, P. & Thornhill, A., 2016. *Research Methods for Business Students*. s.l.:s.n.
- Sharma, K., 2011. *Overview of industrial process automation*. 1 ed. London: Elsevier Inc.
- Sharp, M., Ak, R. & Hedberg, T. J., 2018. A survey of the advancing use and development of machine learning in smart manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*.
- Smith, D. K. & Tardif, M., 2009. *Building Information Modeling: A Strategic Implementation Guide for Architects, Engineers, Constructors, and Real Estate Asset Managers*. 1st ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.
- Tanoli, W., Raza, H., Lee, S. & Seo, J., 2017. PAD Based 3D Earthwork BIM Design Module for Machine Guidance. *ISARC*.
- Tatum, M. C. & Liu, J., 2017. Unmanned Aircraft System Applications In Construction. *Procedia Engineering*, 196(June), pp. 167-175.
- Thunberg, M., Rudberg, M. & Gustavsson, T. K., 2017. Categorising on-site problems - A supply chain management perspective on construction projects. *Construction Innovation*, 17(1), pp. 90-111.
- Tomita, H. et al., 2017. *Development of UAV Indoor Flight Technology for Building Equipment Works*. Taipei, Taiwan, s.n.
- Trochim, W. M., 2006. *Introduction to Validity – Social Research Methods*. [Online] Available at: <http://www.socialresearchmethods.net/kb/introval.php> [Accessed 23 May 2018]
- Usmanov, V., Bruzl, M., Svoboda, P. & Sulc, R., 2017. Modelling of industrial robotic brick system. *ISARC 2017*.
- Waher, P., 2015. *Learning Internet of Things*. Birmingham: Packt Publishing.
- Wang, X. V., Kemény, Z., Vánza, J. & Wang, L., 2017. Human–robot collaborative assembly in cyber-physical production: Classification framework and implementation. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Volume 66, pp. 5-8.
- Webb, P. et al., 2015. Advanced flexible automation cell control for aerospace manufacturing. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal*, 87(2), pp. 156-164.
- Wu, P., Wang, J. & Wang, X., 2016. A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry. *Automation in Construction*, Volume 68, pp. 21-31.
- Vähä, P., Heikkilä, T. & Kilpeläinen, P., 2013. Extending automation of building construction — Survey on potential sensor technologies and robotic applications. *Automation in Construction*, Volume 36, pp. 168-178.

- Yin, R. K., 2014. *Case Study Research: Design and Methods*. 5th ed. s.l.:SAGE Publications.
- Zhang, Y. & Tao, F., 2017. *Optimization of Manufacturing System Using the Internet of Things*. London: Elsevier Inc.
- Zou, Y., Kiviniemi, A. & Jones, S. W., 2017. A review of risk management through BIM and BIM-related technologies. *Safety Science*, Volume 97, pp. 88-98.

7.1 Global Analysis References

- ABB, 2017. *ABB: Products: Industrirobotar: irb 8700*. [Online]
Available at: <https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK106713A0323&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
[Accessed 26 04 2018].
- ABB, 2017. *ABB: Products: Robotics: Industrirobotar: YuMi*. [Online]
Available at:
<http://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK106354A3254&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
[Accessed 26 04 2018].
- ABB, 2018. *ABB: Products: Industrial robots: IRB 4600*. [Online]
Available at: https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=ROB0109EN_G&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch
[Accessed 11 05 2018].
- ABB, 2018. *ABB: Teknik: Så funkar det: Industriroboten*. [Online]
Available at: <http://new.abb.com/se/om-abb/teknik/sa-funkar-det/industrirobotar>
[Accessed 26 04 2018].
- Alitrak, 2018. *Alitrak: About us*. [Online]
Available at: <http://www.alitrak.com/about-us/>
[Accessed 10 05 2018].
- Build-r, 2017. *Build-r Robot Construction: Another post*. [Online]
Available at: <http://www.build-r.com/another-post/>
[Accessed 30 04 2018].
- Build-r, 2018. *Build-r Robotic Construction*. [Online]
Available at: <http://www.build-r.com/>
[Accessed 29 04 2018].
- Caterpillar, 2017. *Caterpillar: Company: Innovation: Caterpillar-ventures: News*. [Online]
Available at: <https://www.caterpillar.com/en/company/innovation/caterpillar-ventures/news/fastbrickroboticssignsmemorandumofunderstandingwithcaterpillarin.html>
[Accessed 28 04 2018].

- Construction Robotics, 2018. *Construction Robotics*. [Online]
Available at: <http://www.construction-robotics.com/>
[Accessed 29 04 2018].
- ETH Zürich, 2017. *ETH zürich: News and Events: ETH News: Building with robots and 3D printers*. [Online]
Available at: <http://www.dfab.ch/achievements/building-with-robots-and-3d-printers-construction-of-the-dfab-house-up-and-running/>
[Accessed 30 04 2018].
- ETH Zürich, 2018. *ETH Zürich: ETH Zurich*. [Online]
Available at: <https://www.ethz.ch/en/the-eth-zurich.html>
[Accessed 29 04 2018].
- FANUC, 2017. *FANUC: Robots: Robot finder: m 710 series*. [Online]
Available at: <https://www.fanuc.eu/se/en/robots/robot-filter-page/m-710-series/m-710ic-45m?returnurl=https%3A%2F%2Fwww.fanuc.eu%2Fse%2Fen%2Frobots%2Frobot-filter-page%23%3Ft%3Dc1494f783e1f441a8472ab688bf9ca08%2C1fc42cb423f2445bb0da1ea4a885389a%257C01b61162c6b4490893dbb>
[Accessed 11 05 2018].
- FANUC, 2018. *FANUC: Robots*. [Online]
Available at: <https://www.fanuc.eu/se/en/robots>
[Accessed 26 04 2018].
- Health and Safety Executive (HSE), 2016. *Statistics on Fatal Injuries in the Workplace in Great Britain*. [Online]
Available at: <http://www.hse.gov.uk/statistics/pdf/fatalinjuries.pdf>
[Accessed 10 04 2018].
- Fastbrick Robotics, 2018. *Fastbrick Robotics: About*. [Online]
Available at: <https://www.fbr.com.au/view/home>
[Accessed 28 04 2018].
- Komatsu, 2017. *Komatsu: Company info: Press release: 2017*. [Online]
Available at: https://home.komatsu/en/press/2017/others/1198452_1824.html
[Accessed 30 04 2018].
- MX3D, 2018. *MX3D: About*. [Online]
Available at: <http://mx3d.com/about/>
[Accessed 01 05 2018].
- nLink, 2017. *nLink*. [Online]
Available at: <https://www.nlink.no/>
[Accessed 29 04 2018].
- Nvidia, 2017. *Nvidia: news: Japan's Komatsu Selects NVIDIA as Partner for Deploying AI to Create Safer, More Efficient Construction Sites*. [Online]
Available at: <https://nvidianews.nvidia.com/news/japans-komatsu-selects-nvidia-as->

partner-for-deploying-ai-to-create-safer-more-efficient-construction-sites
[Accessed 30 04 2018].

Odico Formwork Robotics, 2018. *Odico: About*. [Online]
Available at: <https://odico.dk/01-aabout>
[Accessed 02 05 2018].

Sektionen för kommunikation och externa relationer, 2017. *Mälardalens Högskola*.
[Online]
Available at: <http://www.mdh.se/75-miljoner-kronor-satsas-pa-array-industriforskarskola-vid-mdh-med-fokus-pa-automation-1.107422>
[Accessed 26 04 2018].

Smart Built Environment, 2017. *Smart Built: Projekt: Nya tillämpningar: Build-r*. [Online]
Available at: <http://www.smartbuilt.se/projekt/nya-tillaempningar/build-r/>
[Accessed 29 04 2018].

Skanska, 2017. *Skanska: om skanska: press: pressmeddelande*. [Online]
Available at: <https://www.skanska.se/om-skanska/press/pressmeddelanden/210629/Skanska-etablerar-Sveriges-forsta-hogskolesamarbete-for-utveckling-av-robotapplikationer-for-byggautomation>
[Accessed 02 05 2018].

Skanska, 2018. *Skanska*. [Online]
Available at: <https://www.skanska.se/>
[Accessed 22 02 2018].

Volvo CE, 2017. *Volvo CE: Global: spirit-magazine: electrifying-research*. [Online]
Available at: <https://www.volvoce.com/global/en/spirit-magazine/electrifying-research/>
[Accessed 10 05 2018].

APPENDIX – Additional Renditions of Concept Case



Figure 4: Additional render of concept case - no.1



Figure 5: Additional render of concept case - no.2

Slutrapport SBUF 13556

Referens nr 7



Development Project of a Robotic Tool for an Automated Rebar Cage Assembly Station

- Development and Construction

Master Thesis
Advanced level, 30 credits

Product and Process Development

Anton Sandegren & Erik Viström

Mälardalen University, Academy of Innovation, Design and Engineering
Date of presentation: 18-01-2017
Supervisor Robotdalen: Erik Hellström
Supervisor Mälardalens Högskola: Janne Carlsson
Examiner: Sten Grahn

Abstract

This report presents a master thesis that have been conducted at Mälardalen University during the fall of 2017. The work includes 30 credits on the subject of product development.

Skanska and Robotdalen are currently working on a development project with the aim to replace manual operation sequences with a complex automated process that utilises industrial robots. The purpose behind this project is to improve the efficiency of rebar cage assembly processes that is currently being done manually by construction workers. Assembling rebar cages is hard labour that is time consuming, costly, and is common to cause injury to construction workers.

The purpose of this thesis work was to evaluate the possibilities and compile relevant information that is needed to develop a custom robotic grip and tying tool that can handle and tie rebars together using an industrial robot. The aim was to present the gathered information and to develop a concept for a custom grip and tying tool as well as manufacture a mock-up that shows size of the tool and the integrated components as well as proves the basic functions of the tool.

Two research questions have been used to identify the specific objective of the thesis.

§ RQ1: What is required of a robotic tool to tie cylindrical objects using an industrial robot in an automated process?

§ RQ2: How should a robotic tool be designed to safely handle cylindrical objects as well as tie high strength knots in an automated process?

A large part of the project consists of a pre-study that was carried out with the aim to identify all the factors that would be affected when automating the construction process, but also to find all requirements that would be requested by such a tool. The Mechanical Design Process by David G. Ullman, combined with theories from Karl T. Ulrich and Steven D. Eppinger have been used as a basis for the development methods of this project. Several concepts were developed based on the technical requirements that had been developed to meet the requirements that were set by the customers. By evaluating the concepts using a Pugh's matrix combined with discussions with supervisors at Skanska and Robotdalen a concept was selected that then was developed into a final concept. The concept was then refined and optimised using tools to evaluate and identify problems and risks with the design.

The result of this thesis is a concept of a custom grip and tying tool for an industrial robot. It includes all required components with relevant information and drawings. The concept shows a design with requirements of what is required to theoretically be able to tie cylindrical objects using an industrial robot. The result also presents a mock-up that have been manufactured using 3D-printed and CNC-milled components.

The work concludes that this kind of tool is needed to be able to maximise the efficiency of an automated rebar construction process. By combining two functions, the need for a tool change is removed, and in turn this could shorten the assembly process by up to 40 minutes per cage.

Keywords:

Automation, product development, rebar, rebar cage, reinforcing bar, robotic technology, robotic system, robotic tool, tying.

Sammanfattning

Denna rapport presenterar ett examensarbete på avancerad nivå som utförts på Mälardalens Högskola höstterminen 2017. Arbetet innefattar 30 högskolepoäng inom området produktutveckling.

Skanska och Robotdalen arbetar just nu tillsammans i ett utvecklingsprojekt som går ut på att ersätta idag manuella processer med en automatiserad process som använder sig av industrirobotar i ett komplext system. Syftet bakom projektet är att effektivisera det manuella konstruktionsarbetet av armeringskorgar som idag sköts manuellt av personal. Arbetet är tidskrävande, slitsamt och kostsamt.

Syftet med examensarbetet var att utvärdera möjligheterna och att sammanställa relevant information som krävs för att utveckla ett specialanpassat grepp- och najningsverktyg för en industrirobot. Målet i sin tur var att presentera denna information tillsammans med ett koncept för detta verktyg tillsammans med en fysisk mock-up av konceptet.

Arbetet baserades på följande två forskningsfrågor:

§ F1: Vad är det som krävs av ett robotverktyg för att naja cylindriska objekt med hjälp av en industrirobot i en automatiserad process?

§ F2: Hur skall ett robotverktyg vara designat för att säkert kunna hantera cylindriska objekt samt att naja höghållfasta knutar i en automatiserad process?

Arbetet har till stor del innefattat en förstudie som gick ut på att identifiera all de faktorer som påverkas vid en automatisering av denna process, samt att hitta de krav som ställs på denna typ av verktyg. Utvecklingsarbete har baserats på David G. Ullmans produktutvecklingsmetod som har backats upp med teorier av Karl T. Ulrich och Steven D. Eppinger. Flera koncept utvecklades som baserades på den kravspecifikationen som skraddarsyts för att uppfylla alla kundkrav. Genom utvärdering med Pughs matris och diskussion med inblandade i projektet från Skanska och Robotdalen valdes ett koncept som utvecklades till ett slutgiltigt koncept. Konceptet förfinades och optimerades med hjälp av utvärderingsverktyg som identifierade eventuella problem och risker som fanns med designen.

Resultatet av detta examensarbete är ett koncept med alla nödvändiga komponenter för ett specialanpassat grepp- och najningsverktyg för en robot. Konceptet visar på vad som krävs samt hur det skall vara designat för att det teoretiskt skall vara möjligt att naja cylindriska föremål med hjälp av en industrirobot. Resultatet består dessutom av en mock-up som tillverkades av 3D-skrivna och frästa komponenter i olika typer av plastmaterial.

Arbetet visar att ett verktyg av den här typen behövs för att kunna maximera effektiviteten av en automatiserad process vid tillverkning av armeringskorgar. Genom att kombinera två funktioner behövs ej ett verktygsbyte vilket skulle kunna spara upp till 40 minuter per korg.

Nyckelord:

Armeringskorg, armeringsjärn, automation, najning, produktutveckling, robotteknik, robotverktyg, robotsystem.

Acknowledgement

This project is part of a large-scale project that has involved a number of people. The authors would like to begin by expressing their deepest gratitude to Robotdalen and Skanska for the opportunity to perform this thesis and for the opportunity to contribute to, and to be a part of this ongoing project. The authors would like to express their gratitude to Erik Hellström, supervisor at Robotdalen, as well as the rest of the project team at Robotdalen, Anders Thunell, Josef Holmner and Ingemar Reyier who have assisted with their knowledge and guidance throughout the course of this project.

Patrik Groth, project owner at Skanska has been involved in this project through regular meetings and contact. The authors are thankful for having good contact with Patrik and would like to express their gratitude for all the help that has been given in this project.

The authors would like to thank Janne Carlsson, supervisor at Mälardalen University and Henrik Lekryd, workshop technician at Mälardalen University for their expertise and assistance. They have assisted with their knowledge during different stages of the project.

To conclude, the authors would like to thank everyone else that have been involved during this thesis. This includes everyone at Skanska and Robotdalen that have been introduced during meetings and events. A thank you goes out to everyone who have taken part in interviews and who have answered questions to assist and help in this project.

The authors hope that this project thesis can be of use to Skanska, and wish them the best of luck in their project to take the construction industry into a new era.

Abbreviations and List of Words

ARCAS	Automated Rebar Cage Assembly Station
CAD	Computer Aided Design
DIVA	Digitala Vetenskapliga Arkivet
DFA	Design for Assembly
DFE	Design for Environment
DFM	Design for Manufacturing
DFMain	Design for Maintenance
DFx	Design for x
FEA	Finite Element Analysis
FMEA	Failure Modes and Effects Analysis
IP-Code	International Protection Marking
QFD	Quality Function Deployment
Rebar	Reinforcing bars
RQ	Research Question
Robotstudio	ABB simulation software for robot applications
SolidWorks	A CAD-Software

Table of Contents

Abstract	I
Sammanfattning	II
Acknowledgement	III
Abbreviations and List of Words	IV
List of Appendices	VII
List of Figures	VII
List of Tables	IX
1 Introduction	1
1.1 Background	1
1.2 Problem Formulation	2
1.3 The Purpose & Aim	2
1.4 Research Questions	3
1.5 Delimitations	3
1.6 Customer Guidelines	3
2 Research Approach & Methodology	4
2.1 Research Methodology	4
2.2 Product and Process Development Methods	5
3 Theoretical Framework	6
3.1 Industrial Robots	6
3.2 Reinforcing Bars	7
3.3 Tying Process	7
3.4 Theoretical Methods for Product Development	8
4 Empirical Data	13
4.1 Project Planning	13
4.2 Product Definition	13
4.3 Conceptual Design	25
4.4 Product Development	28
4.5 Product Support	40
5 Result	42
6 Analysis	49
6.1 Analysis of Problem Formulation	49
6.2 Analysis of Research Questions	49

6.3	Analysis of Technical Specifications	50
6.4	Analysis of Customer Guidelines	51
7	Discussion, Conclusions & Recommendations.....	53
7.1	Discussion	53
7.2	Conclusion	53
7.3	Recommendations.....	54
8	References	56

List of Appendices

APPENDIX A.	Gantt Chart	
APPENDIX B.	Situation Analysis	
APPENDIX C.	Reverse Engineering	
APPENDIX D.	Practical Laboratory Tests	
APPENDIX E.	Interviews and Observations	
APPENDIX F.	QFD	
APPENDIX G.	Technical Requirements	
APPENDIX H.	Concepts	
APPENDIX I.	FMEA	
APPENDIX J.	Component Specifications and Drawings	

List of Figures

Figure 1 - Illustration of an early ARCAS concept (Figure taken from Robotstudio)	2
Figure 2 - ABB robot IRB4600 (New.abb, 2016)	6
Figure 3 - Coiled reinforcing bars (concrete-mesh, 2016)	7
Figure 4 - Manual hand tie (Spiksäkert, 2017).....	8
Figure 5 - Illustration of product development process.....	8
Figure 6 - Bridge pier rebar cage (visualisation from Robotstudio)	13
Figure 7 - Illustration of S, L and U shaped rebars	14
Figure 8 - Concept of ARCAS (Illustration from Robotstudio)	14
Figure 9 - Extreme case (Illustration from Robotstudio).....	15
Figure 10 - Extreme case (Illustration from Robotstudio)	16
Figure 11 - Extreme case (Illustration from Robotstudio)	16
Figure 12 - Extreme case (Illustration from Robotstudio)	16
Figure 13 - Extreme case (Illustration from Robotstudio)	17
Figure 14 - Function tree	18
Figure 15 - Internal functions of a TJEP XP25.....	23
Figure 16 – Example of straight knot, topknot and flat knot	26
Figure 17 - Simplified concept visualisation	28
Figure 18 - Illustration of estimated angle	29
Figure 19 - Illustration of cylinder forces on lever arms	30
Figure 20 - Simplified illustration of tying mechanism	31
Figure 21 - Wireframe illustration of feeder mechanism	33
Figure 22 - FEA stress result of internal body	37

Figure 23 - FEA deformation result of internal body.....	38
Figure 24 – Stress result of jaws	39
Figure 25 – Deformation result of jaws.....	39
Figure 26 – Manufactured parts for the mock-up	41
Figure 27 - Concept of custom robotic grip and tying tool	42
Figure 28 - Tool grips a rebar	43
Figure 29 - Internal body and components	43
Figure 30 - Close up of wire head and wire	44
Figure 31 – Illustration of tying process divided in three steps.....	44
Figure 32 – Close up of a straight knot.....	45
Figure 33 – Exploded view of tying system	45
Figure 34 – Close up of tying area.....	46
Figure 35 – Close up of feeder system and adjacent components.....	46
Figure 36 – Exploded view of body components	47
Figure 37 – 2D drawing of external tool dimensions	48
Figure 38 - Pictures of Wacker Neuson DF16 (wackerdirect, 2016)	V
Figure 39 - Tjep RE-BAR XP58 (Tjep, 2016)	VI
Figure 40 - BNT-64 Rebar tier (Bnproducts, 2016)	VI
Figure 41 - Tytecker Rebar Pro (Tytecker, 2016).....	VII
Figure 42 - Knut 39 from Atlas Copco (Atlas Copco, 2016).....	VII
Figure 43 - MAX RB517 (maxusacorp, 2016).....	VIII
Figure 44 - Overview of Tjep XP25	XI
Figure 45 - Length of Tjep XP25.....	XI
Figure 46 - Tying tool with adapter plate.....	XII
Figure 47 – Close-up of jaws.....	XII
Figure 48 – Close-up on Feeder mechanism	XIII
Figure 49 - Close-up on wire spool.....	XIII
Figure 50 - Close-up on wire path	XIV
Figure 51 - Close-up on wire loop	XIV
Figure 52 - Tying and cutter mechanism.....	XV
Figure 53 - Galdabini Quasar 100 tensile strength test machine	XVIII
Figure 54 - Design of a RB 655 and RB517 knot.....	XXIII
Figure 55 - Design of two Knut 39 knots.....	XXIII
Figure 56 - Graph force – deformation comparison	XXIV
Figure 57 - Graph force – deformation comparison	XXIV
Figure 58 - Close-up Knut 39	XXXI
Figure 59 - Close-up on a knot tied by a Knut 39	XXXI

List of Tables

Table 1 - Function list	18
Table 2 - Study of rebar tiers	19
Table 3 - Chart describing the requirement spread and importance found in QFD.....	24
Table 4 - Concepts from brainstorming session	26
Table 5 - Pugh's matrix	27
Table 6 - Comparison rebar tiers	IX
Table 7 - Test result XP25	XVIII
Table 8 - Test result RB398	XIX
Table 9 - Test result RB517	XIX
Table 10 - Test result RB655	XX
Table 11 - Test result Knut 39	XX
Table 12 - Test result manual hand tie 1,5 mm	XXI
Table 13 - Test result manual hand tie 0,8 mm	XXII
Table 14 - Table of technical specifications	XXXVI
Table 15 - List of components	XLIV

1 Introduction

This chapter presents the background for the project of this thesis. Problem formulation, purpose and aim and research questions together with delimitations and customer guidelines are also presented in this chapter.

1.1 Background

1.1.1 Robotdalen

Robotdalen is a Swedish company with the focus to bring together businesses, academia, and public sector to create a climate where innovative robotic solutions for industries, service, and healthcare can be developed. They help innovative companies and inventors to realise ideas and bring them to life. Robotdalen is being funded by Vinnova and the European Regional Development Fund as well as Swedish county administrative boards and local authorities (Robotdalen, 2016).

1.1.2 Skanska

Skanska AB is a Swedish world leading construction group that was established in 1887 with the name *Skånska Cementgjuteriet*. At that time the main focus was to manufacture concrete products. Today it is considered to be the biggest Swedish construction company with national as well as international operations with almost 50 000 employees worldwide.

Skanska divides its operations into four different business streams, *Construction, Residential Development, Commercial Property Development* and *Infrastructure Development* (Skanska, 2016).

1.1.3 Project

During modern day bridge construction, some bridges are constructed using pre-made segments that are assembled together to create the bridge. When building concrete bridges, these segments consist of reinforced concrete. The reinforcement most commonly used are rebar cages. Smaller cages can be built at a workshop while the larger scale cages must be built at the construction site before being lifted into the mould and covered in concrete. The process of building rebar cages is most commonly built by hand by construction workers. This part of the building process puts a lot of strain on the workers and as a result of the Human factor the risk of failure in the cages is pretty high.

The National Institute for Occupational Safety and Health has conducted a study where they investigated the risk for construction workers to develop back and hand injuries from hand-tying rebars. The study proved that by using an electric tying tool instead of tying by hand, the tension on back and hand-injuries significant reduces. The conclusion of the study was that besides the obvious benefits with the improved work environment for the workers there were also big savings by reducing work absent caused by work related strain injuries and improving work efficiency (Hudock, 2007).

With this knowledge, combined with the assumption that time and money could be saved, the development manager Lars Pettersson developed a concept that with the help of industrial robots get a fully automated work station with the capability to build rebar cages. A business case has been made on a specific project showing that a nine month project could have been reduced to six months by using this concept. This would have resulted in savings of up to 3,5 MSEK, reducing material waste and negative environmental effects.

Skanska launched a project together with Robotdalen with the aim to develop an *Automated Rebar Cage Assembly Station* (ARCAS). The main goal of the project is to

have a fully automated process all the way from CAD-software to a manufactured rebar cage.

The first stage of the project was a *proof of concept* and was done as a preliminary study in which the technical aspects were identified and evaluated. Simulations and tests have been done in Robotstudio using three robots to gain basic understanding about the concept. This stage has resulted in a scale model of the ARCAS combined with a TJEP XP25 hand held rebar tier that is used for more advanced testing in a physical environment.



Figure 1 - Illustration of an early ARCAS concept (Figure taken from Robotstudio)

1.2 Problem Formulation

During the process of manually constructing the rebar cages there are several working sequences that has to be carried out by each worker. If a robotic system is to execute the same process, it must be flexible and adapted to solve a large number of working moments. There are currently no robotic tools on the market that can solve the same tasks as a construction worker. This resulted in the need of a *custom grip and tying tool*. The proof of concept shows two major focus areas that has to be solved by the purpose of this tool.

When moving a rebar, one robot will guide the rebar into position while the other robots, one of these issued with *the custom grip and tying tool*, follows and carries the rebar. In order to make this possible, the tool must grip and hold a rebar, but still allow the rebar to rotate and run freely while being held by the tool.

Rebar cages consists of a wide range of rebar dimensions that are tied together adjacent or in different angles to each other. The work sequences of the ARCAS process requires the tool to handle a various range of rebar dimensions but still fit strict regulations of space to avoid collisions with the rebar cage. A result from using the ARCAS is that the cages will be built in larger scale and knots in the structure will have to deal with high loads in a variation of directions as well as vibrations and forces during transportation.

1.3 The Purpose & Aim

The purpose with this thesis is to evaluate the possibilities to tie and handle rebars in an automatic rebar cage assembly process.

The aim of this thesis is to develop a concept for a *custom grip and tying tool*, manufacture a mock-up that shows size and functions of the tool, and present relevant information for future work with the project.

1.4 Research Questions

To be able to fulfil the aim of the thesis, the following research questions were formulated:

§ RQ1: *What is required of a robotic tool to tie cylindrical objects using an industrial robot in an automated process?*

§ RQ2: *How should a robotic tool be designed to safely handle cylindrical objects as well as tie high strength knots in an automated process?*

1.5 Delimitations

The project distributes 1600 hours over a 20 week period. The delimitations were developed together with supervisors at Robotdalen and Skanska to ensure quality of the end result.

- The development of the concept will only focus on the cage used in the *proof of concept*, a foundation plate of a large bridge pier.
- The final concept will not include a fully developed electronic system.
- The mock-up will only focus on the size and the basic functions of the tool and no advanced testing will be carried out at the end of the project.
- No evaluation or specification of an external wire system will be made.

1.6 Customer Guidelines

At the beginning of the project Skanska AB and Robotdalen presented guidelines desired for the robotic tying tool. The following list presents these guidelines.

- Focus on finding a solution using regular 1,5 mm steel wire.
- Focus on finding solutions based on reliable and proven methods.
- It is desired to tie and handle rebars with a diameter up to 32 mm.
- It is desired that the tool can fixate the rebar while making a knot.

2 Research Approach & Methodology

The thesis work consists of theoretical studies and analysis, product development and selection of components. This chapter presents the research approach and methodology used when conducting the thesis work.

2.1 Research Methodology

Research methodology is about using systematic methods and ways to solve a problem, and a science of studying how research is to be carried out. To be able to choose the appropriate approach for research, the already existing body of knowledge in a particular area must be analysed. If there is little knowledge in a field, there is a need of extensive research to get a more fundamental understanding about the subject. This research must be done with an exploratory and investigatory approach. If a fundamental understanding about a particular subject already exists a more descriptive and less investigatory approach can be used (Rajasekar, Philominathan, & Chinnathambi, 2013).

Connecting theories and empirics can be done with different approaches. The main approaches are deductive, inductive and abductive approach. A deductive approach starts out with two or more prepositions and using them to come to a conclusion. Inductive involves working from observations towards an inference while an abductive approach involves working towards an inference by combining observations and facts to find the most likely inference. During the practical laboratory tests an inductive approach was used. Several tools were tested and examined, all test results were analysed to find the best tool in the test group (Epigeum Ltd, 2009).

To achieve the aim of theses it is important to find the best and most effective and suitable approach to the specified topic. There was very little knowledge within the field of rebar tiers, robotics, and rebar cage construction, so these fields were the main focus fields of the investigatory research.

2.1.1 Qualitative and Quantitative Data

Qualitative data is compiled to get a deeper understanding about a particular subject. This kind of data is often gathered using structured or semi structured techniques using focus groups or individual interviews.

Quantitative data is often compiled with the purpose of gathering information or measuring the quantity of a particular phenomenon. This is often gathering information and data that can be analysed using statistical analysis (Ahmadzadeh, 2015).

In the thesis work there was a need to get a deeper understanding of the current situation of the construction of rebar cages, therefore qualitative data was gathered by using interviews, observations and practical laboratory tests.

2.1.2 Secondary and Primary Data Gathering Method

Information and data can be separated into two different groups, primary and secondary information, where the main difference is that the primary information has been compiled explicitly for the current work (Bjorklund & Paulsson, 2014). This meaning that the questions asked are tailored to gather data that will help with a specific study (Ahmadzadeh, 2015).

Secondary data has often been compiled with a different purpose or goal. This data tends to be gathered by other researchers thus being widely available and it allows the user to explore areas of interest without having to go through the data collecting process. (Bjorklund & Paulsson, 2014). During the thesis work secondary data was gathered from literature studies and primary data was gathered using interviews, observations, and practical laboratory tests.

Literature study

Literature is any form of written and reproduced information or material. This material includes sources such as books, magazines and articles. This data is secondary information and one would have to take in to consideration that the information might be biased or partially hiding information (Ahmadzadeh, 2015).

The literature study was based on sources recommended by staff at Mälardalen University. Information was mainly gathered from Google Scholar and Discovery. DiVA has been an important database in the search for secondary information in the form of dissertations and thesis works. The choice of literature was based on an author's expertise in a particular subject.

Information was gathered from suppliers and manufacturers even though such information might be biased. This is not considered an issue due to the fact that the study is done to find the information about the function of the tool and not how it stands against its competitors when it comes to efficiency and price.

Interviews

Interviews are widely used methods of data collection in different science fields. The type of interviewing technique is chosen depending on the type of data that is to be retrieved for a subject.

Unlike a structured interview with direct questions, semi-structured interviews allow for a more open discussion allowing new ideas to be brought up. The interviewer generally has questions or a theme to help focus the interview on the relevant topics without constraining the respondent too much (Manzano, 2016).

During this thesis work primary data was collected with the help of semi-structured interviews with staff from Skanska, mechanics at Ramirent, and product developers at Atlas Copco. Information was also gathered during project meetings and interviews with staff at Robotdalen and Skanska.

Practical laboratory tests

Practical laboratory tests are a form of *applied research* used with the goal to find and gather useful data and information about products, materials or functions. The practical laboratory tests studies individual cases and aims at finding variables which sets the different test subjects apart from each other (Rajasekar, Philominathan, & Chinnathambi, 2013).

During the test phase, several tests were conducted for each tool to find a mean value of each test. This would minimise the differences between each specific test and provide a more useful and realistic test result.

2.2 Product and Process Development Methods

The work carried out in this thesis follows *The Mechanical Design Process* presented by David G. Ullman that has been widely used during the authors' education at Mälardalen University. The theories of Ullman are supported by the product development process developed by Karl T. Ulrich and Steven D. Eppinger to ensure quality assured results. All tools suitable for this product and process development process are presented and described in chapter 3, Theoretical Framework.

3 Theoretical Framework

The following chapter presents the information that was gathered during the early stages of the thesis work with the aim to increase knowledge of the problem area and components as well as to ensure quality of the product development process.

3.1 Industrial Robots

An Industrial robot is a well implemented tool in bigger as well as smaller industrial workshops around the globe. Its superior capability to perform heavy work makes it an obvious choice for cutting-edge companies. ABB is one of the leading suppliers of industrial robots. They have more than 300 000 robots worldwide, and are well known for their high precision and high speed that has reduced lead time and costs for thousands of companies (ABB, 2016).

The most common ABB industrial robots are designed with one arm mounted on a base, which can rotate and use multiple tools. The arm of the robots consists of 4-6 axes, each with an individual servo motors, which make it possible for the robot to accurately perform advanced movements in full speed and with high repeatability within the length of the arm. The robot can be adapted for a desired application, for example, gripping, welding and cutting (ABB, 2016). The robotic system can provide different kinds of medias, such as digital or analogue signals, pneumatic or liquids to an attached tool (Hellström, Hedelind, & Ernlund, 2009).

3.1.1 IRB4600

The IRB4600 is a highly productive robot optimised to work in all kind of applications. It has a compact design and long working range up to 2.51 m. The acceleration of the robot is the fastest in its class and the high speed enables a reduction of lead times by up to 25 percent (ABB, 2016).



Figure 2 - ABB robot IRB4600 (New.abb, 2016)

3.1.2 Tool Changer and Swivel

A tool changer is a module that automatically locks a tool and the robot together. The tool changer is designed to carry load from the tool as well as send electrical signals, pneumatic and different kind of liquids between the robotic tool and the robot (ati-ia, 2016).

The Swivel is a module that allows the tool to be provided with electrical signals and pneumatics and still have the robot motion capabilities fully maintained. That means that the robot is allowed to move all the 6 axes and also rotate freely without limitations of tubes or cables. A tool changer is mounted on the robot, this then locks on to a tool attachment that is mounted directly to the tool (Rsp.eu, 2016).

3.2 Reinforcing Bars

Reinforcing bars, more known as rebars are a reinforcing element commonly used in concrete structures. The rebar has a high strength and are being used with the main purpose of taking up tensile loads. Rebars can be found in sizes between 4 – 36 mm and coiled rebar is common in larger building projects. The rebars are made from hot rolled and annealed high strength steel that is manufactured with a grooved surface structure. This design causes it to bond better with the concrete (BEGROUP, 2012).



Figure 3 - Coiled reinforcing bars (concrete-mesh, 2016)

3.3 Tying Process

Tying is a method of securing components together by binding them together with a steel wire. This specific method is a common way to secure rebars to each other before being covered in concrete. The rebars are assembled into a cage or a grid like pattern according to drawings made by a construction engineer. If the cage was not assembled in its mould, it is transported with the aid of a crane (BEGROUP, 2012).

3.3.1 Tying by Hand

Tying of rebars is a task that is mainly done by hand by construction workers (Atlas Copco, 2016). When a rebar has been placed at its desired location it is secured in place with steel wire that is twisted and then cut. This results in a knot that secures two rebars against each other. The method of tying by hand is a repetitive process that puts strain on the construction workers as a result of the bad working posture that might be necessary to complete the task (byggkatalogen, 2014).

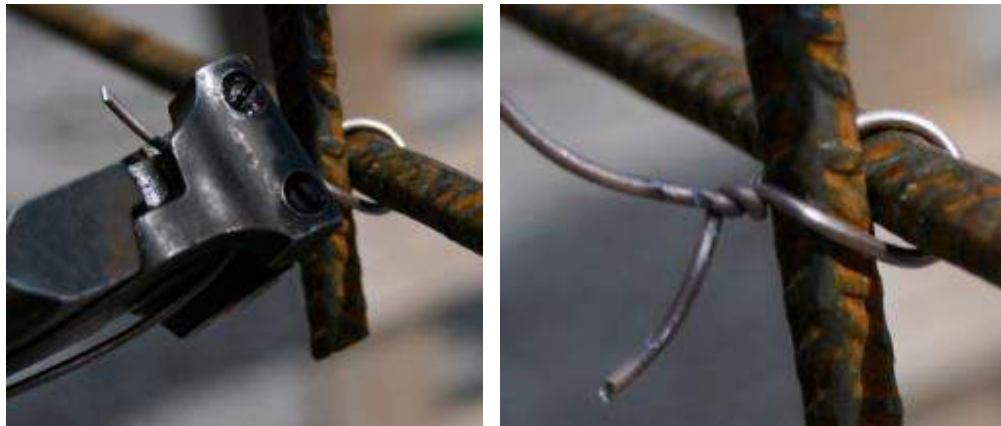


Figure 4 - Manual hand tie (Spiksäkert, 2017)

3.3.2 Tying by Machine

A large number of tools can be found on the market that replicates the tying process made by hand. These machines make knots similar to those made when tying by hand but it reduces the time it takes to tie each rebar. This tool also makes for a more ergonomic working condition which can reduce the strain on workers (Sandberg & Hjort, 1998).

3.4 Theoretical Methods for Product Development

This chapter presents the methods used during the product development phase of the thesis work. The methods are based on David G. Ullmans design process and the process is illustrated in figure 5.

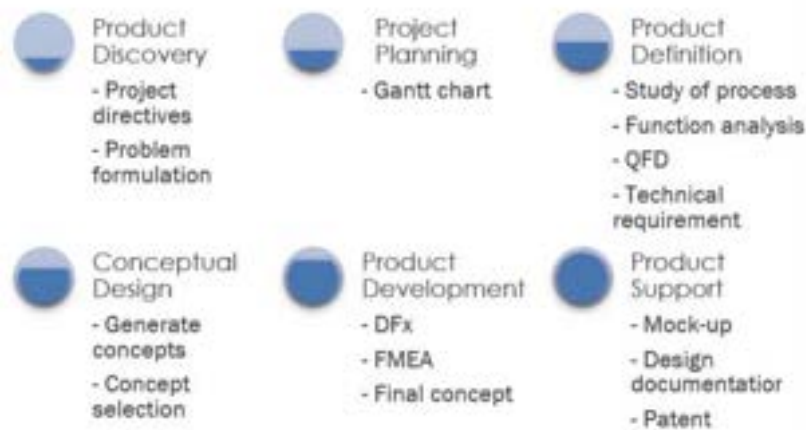


Figure 5 - Illustration of product development process

3.4.1 Project Planning

For planning and managing the project for this thesis work following method were used.

Gantt chart

To ensure a successful project there is a need to have structured time schedule. A Gantt chart helps to break down the project into tasks that have to be accomplished to finish the project. The chart is designed with all the tasks placed on a timeline. This gives a good overview of all dependency between tasks and time required to complete them (Ullman, 2010).

3.4.2 Product Definition

To be able to develop a quality product there is a need to first understand the product demands and establish requirements. Ullman advocates following methods.

Function analysis

With the help of a function analysis it is possible to establish the functions required for the desired result. The method breaks down the functions into sub functions until the level suitable for solving the problem is reached without presenting any information on how the functions will be achieved. The functions can be presented in a function list, it can also be presented in a feature tree that helps to identify and visualise the relationship between the functions (Ullman, 2010).

Situational analysis

A situational analysis is an advanced method used to systematically ask relevant questions that are used to define the current state of a situation. It is a method founded by Adele Clark, and according to her it can be implemented in a wide variety of research projects. Data mapping is divided into three cartographic approaches, Situational, social worlds/arenas and positional maps (Clarke, 2005).

Quality function deployment

The Quality Function Deployment (QFD) is one of the most used methods during the product development process of today. The main function of the QFD is to generate the information needed to the engineering specifications as well as the product development phase.

The QFD is generated with the help of a house of quality which can be described as a house shaped chart. The chart consists of different rooms each containing valuable information for the project itself (Ullman, 2010).

Reverse engineering

Understanding how others have solved a specific problem for a product can be a key part during a product development project. Reverse engineering is used to understand how a product works, with the main goal to identify the functions of the product, and the components needed to fulfil each function. The method is divided into three steps, first, examine the whole device and interfaces with other objects. Second, remove components for more detailed view. Thirdly, examine each interface to find the flow of energy, information or materials (Ullman, 2010).

The information gathered from the reverse engineering can thereafter be used when designing the functions of a product in the development phase.

Technical Specifications

The technical specifications are a part of the QFD and results in a restatement of the customer requirements in terms of measurable specifications with target values. These specifications are very important during a development process to save time and money and improve quality (Ullman, 2010).

3.4.3 Conceptual Design

The conceptual design phase is about generating and evaluating concepts for the product development project, the following methods have been applied during this phase of the thesis work.

Brainstorming

One of the most commonly used methods for generating ideas is brainstorming. The method is based on knowledge of the functions and can either be performed as a group-oriented technique or individually.

The brainstorming session is accomplished by the group or person orally generating and finding ideas that an appointed secretary writes down, the ideas should not be evaluated or judged during the session. The goal is to present as many ideas possible, some ideas may seem silly or impossible, but they may lead to some useful ideas (Ullman, 2010).

Pugh's matrix

The Pugh's matrix is a method used to systematically compare alternative concepts during the product development phase. The concepts are compared to a reference concept with the help of measurable criteria. Each criterion has a value of importance that is used to find the concept that accomplishes most of the customer requirements (Ullman, 2010).

Computer aided design

CAD, or Computer Aided Design is a type of software used to generate, display and analyse three-dimensional designs. This type of workflow may enhance communication within the product development group and limit the time needed to visualise the concept compared to manually generated sketches (Cardaci, 1992). Also, the CAD systems will allow users to generate drawings and control models which for example can be used to calculate stresses and strengths in materials (Ulrich & Eppinger, 2011).

3.4.4 Product Development

This phase develops the best concept into a fully functioning product that is evaluated to find areas of improvement.

Failure Modes and Effects Analysis, FMEA

Reliability and quality are important in any product, this makes the identification of potential failures important. Failure Modes and Effect Analysis is a tool used to find potential failures in a product, evaluate the effects of these failures and find solutions to correct the risks of failure.

In *The Mechanical Design Process*, David G. Ullman presents five steps that can be used when developing a FMEA table to ensure quality results.

1. Identify functions affected - List all the functions that can be affected by a failure.
2. Identify failure modes - Describe the way a failure can occur.
3. Identify the effects of a failure - Find consequences of a failure and analyse what else that might happen as a result from a failure.
4. Identify the causes for failures and errors - List the type of error that can result in a failure.
5. Identify actions to correct risks of failure - Find corrective actions that can be taken to ensure prevention of a failure.

(Ullman, 2010).

Design for x, DFX

There are a number of evaluation tools with the focus on design that can be used during a product development process. Some of these have been merged into a group of tools called Design for X, where X represents a specific focus area.

Design for Manufacturing, DFM

Design for manufacturing (DFM) is a method used throughout a development process and it begins with the concept development phase. It is a tool used to evaluate and improve the manufacturability of a concept or a product (Ulrich & Eppinger, 2011). DFM includes the manufacturing process from a component level all the way to a complete product. Ullman defines this as *establishing the shape of components to allow for efficient, high-quality manufacture* (Ullman, 2010).

Design for Assembly, DFA

Design for Assembly (DFA) is a well-established sub category to DFM that focus on evaluating and then improving components, modules, and assembly stations to make an assembly process as smooth as possible (Ulrich & Eppinger, 2011). This can be done by reducing the number of different types of components as well as the number of components, ensuring accessibility and reducing complexity (Ullman, 2010).

Some of the advantages with DFA is to reduce lead times and assembly costs. Rolf Lövgren presents a list of guidelines to help ensure a quality DFA process. Some of them are presented in the list below.

- Reduce number of fasteners and overall components.
- Use a suitable base component and make sure that it can be fixed during the assembly process.
- Use symmetrical components as well as symmetrical assembly directions of components.
- Ensure accessibility of components during assembly.

(Lövgren, 2009).

Design for Maintenance, DFMain

Design for Maintenance (DFMain) focus on evaluating and improving the maintainability of a product. This includes looking on placement of components, accessibility of fasteners as well as the variety of components in a product. There are primarily two ways to work with DFMain, either the product is designed to work without maintenance or it is optimised to make maintenance easy (Markeset & Kumar, 2001).

Design for Environment, DFE

The focus of DFE is the effect a product can have on the environment during its life cycle. The goal of DFE is to reduce the negative impacts on the environment as a result of the existence of a product. Ullman presents four guidelines that may help when implementing DFE in a development process:

Guideline 1: Be aware of the environmental effects on the materials used in products.

Guideline 2: Design the product with high separability.

Guideline 3: Design components that can be reused or recycled.

Guideline 4: Be aware of the environmental effects of the material not reused or recycled.

(Ullman, 2010).

In *Product Design and Development* by Ulrich and Eppinger they present examples of DFE goals that are arranged to the life cycle stages of a product. They mean that this

can be used to find areas of improvement during the life cycle of a product (Ulrich & Eppinger, 2011).

Finite Element Analysis, FEA

The finite element analysis is a practical application of the *finite element method*. It is most commonly applied in engineering for performing engineering analysis. It uses software that divides mathematical problems into small elements and then solving each element individually. In SolidWorks, the size of this elements is referred to as mesh. The size of a mesh is one of the main contributing factors to the result from the analysis. SolidWorks has an add-in that allows the user to calculate the stresses, deformation and physical behaviour of a design. The tool allows the user to easy ensure high quality, performance and safety in a product (Solidworks, 2016).

4 Empirical Data

This chapter presents the results of the tools used during the various stages of the product development process that were presented in the theoretical framework.

4.1 Project Planning

4.1.1 Gantt Chart

At an early stage of the project a Gantt chart was created to function as a support to achieve the best product development possible. The chart presents the 1600 work hours that are given for the thesis work. The time was divided into the different sub categories based from Ullman's mechanical design process, including building of mock-up, opposition, and presentation. The Gantt chart, with the planned work flow and the actual outcome is presented in appendix A.

4.2 Product Definition

The goal of a product definition phase is to understand the problem and to lay a foundation for the remainder of the project and the product development. One important focus was to generate customer requirements for the conceptual design phase of the project.

4.2.1 Study of Process

The ARCAS process is a complex process, so to be able to develop a successful concept a pre-study had to be made. The study was divided in to three categories, a study of the rebar cage design, the process of the ARCAS, and the process flow of the rebar tying tool. The information presented in this chapter have been acquired from Robotstudio, earlier thesis works and the project leaders at Robotdalen.

Rebar cage

The development team at Robotdalen are currently focusing on a specific rebar cage design, a foundation plate of a large bridge pier. Bridge construction uses a wide variety of foundations and piers depending on bridge design and environmental conditions, so the process has been developed to be applicable to all kinds of rebar cage designs.

370 rebars are tied together to make up a 10,5 x 3,5 x 2,8 m cage with a total weight of 4000 kg. The cage will have a minimum of 1800 knots. A variety of rebar designs are required to manufacture a rebar cage. The thickness of the rebars in this cage have a diameter ranging from 12 to 25 mm. It is desirable to have a tool that can handle rebars with a diameter ranging from 12 to 32 mm.

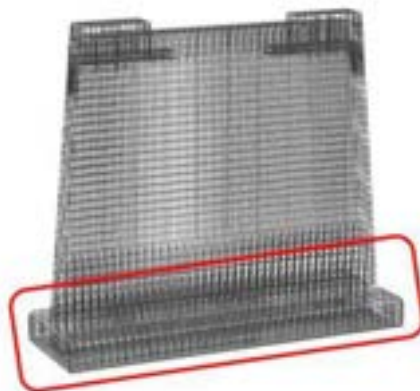


Figure 6 - Bridge pier rebar cage (visualisation from Robotstudio)



Figure 7 - Illustration of S, L and U shaped rebars

The cage for the foundation plate consists of three different designs for the rebars, straight, L-shaped and U-shaped. Which will be referred to as S, L and U.

Process for ARCAS

The primary focus of the development of the ARCAS is for it to be implemented at construction sites for concrete bridges.

Before the process can begin, a mechanical engineer has designed a model of the rebar cage in a CAD-software called Tekla, the model is sent to an autonomous program that creates a code which the system will use to control the robots.

When the system is ready to start the process, rebar is fed from coils in to a rebar straightener. The rebar is then cut into the desired length with an automatic rebar cutter and if necessary, bent using an automatic rebar bender. With the help of an automatic fixture, the rebar is placed in a specified position, this gives the robots information about the current position of the rebar.

At this stage the three industrial ABB robots, model IRB4600, moves to the fixture to pick up, move, and reposition the rebar to its desired location. When the rebar is positioned, one of the robots begins to fix it in place using a tying tool. Three or more different tools are required for this process, one special developed gripping tool, a simple gripping tool and the rebar tier tool.

All steps are repeated until a cage has been assembled. When a cage is complete it is transferred to a casting mould using a crane, see figure 8, and the assembly station can start working on a new cage.

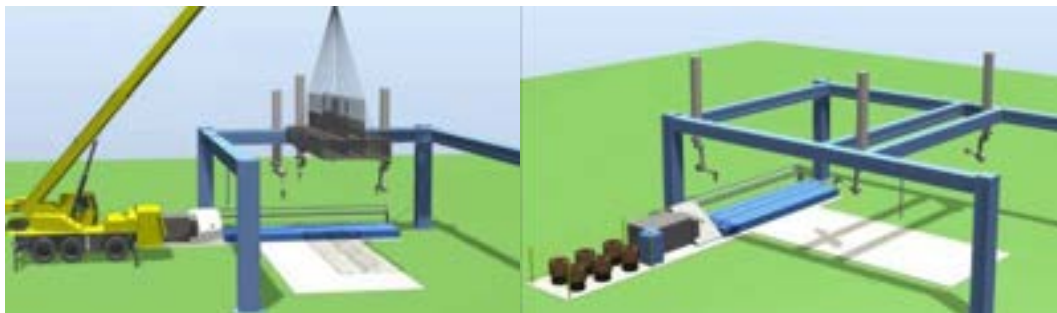


Figure 8 - Concept of ARCAS (Illustration from Robotstudio)

Process of the tool

The process flow of the desired tool was studied to find key aspects that later could be used in the product development process. A large number of the key aspects found during this study was used as a basis for the engineering requirements. The process was divided in to three steps that each presents the purpose of the tool.

Step 1. Locate and grip

Three robots, one issued with the tying tool will locate, grip and lift the rebar from the fixture. The first step for the tool is to locate and grip the rebar in the fixture, which is designed so that the robots can grip the rebar without any risk for collision. During this step, some important factors are grip width, dimensions of the tool and grip force. The fixture is designed to allow a maximum of 10 mm bending of a rebar.

Step 2. Movement from fixture

When the robots have gripped the rebar, it is lifted from its position at the fixture and transferred to the position where it will be fixed. The sequence of which it will be transferred may differ depending on shape and size of the particular rebar. However, the orientation of the tool during the sequence of lifting and transferring a rebar will always be the same. The rebar will always be lifted in such a manner that it is located directly under the link between the robot and the tool.

During this phase the tying tool will be expose to vertical and horizontal torque and loads as an effect of the moving rebar.

Some rebars will have a weight up to 60 kg, which results in each tool having to carry a load up to 20 kg. The robots will reposition the rebar to its desired location before next step. Calculations of forces acting on the tool will be carried out in a later stage of the development process.

Step 3. Tying process

In this step of the process the tying tool will both hold the rebar at its desired location and tie it to one or multiple rebars. It is desired that the tying tool can "zero in" on a rebar and fixate it to a pre-specified spot even though the bar is out of location as a result of bending or deformity.

There are several extreme cases that has to be taken into account to get a flawless tying process. An extreme case is when the tying tool must deal with more complex movements or positions to be able to execute the tying, or when rebars are to be tied in a large number. If the tool manages to handle these extreme cases it automatically handles all the basic ties.

The cage that was inspected in this project has four types of extreme cases and these were identified, reviewed, and measured with the help of a process simulation from Robotstudio. The tool shown in the pictures below is only a visualisation of a temporary tying tool that has been used for a working simulation.

The most common extreme case that will occur is when the robot is forced to reach down in to the cage to perform a tie. This will result in restrictions of the tool dimensions. One major factor to take into consideration is that nearby rebars can cause tying failure if the tying wire collides with these rebars. This data heavily restricts the dimensions of the wire guides.



Figure 9 - Extreme case (Illustration from Robotstudio)

During one stage of the assembly process the tool must reach down in to the cage with a steep angle due the rebars located above the tying location. This can be seen in figure 10.

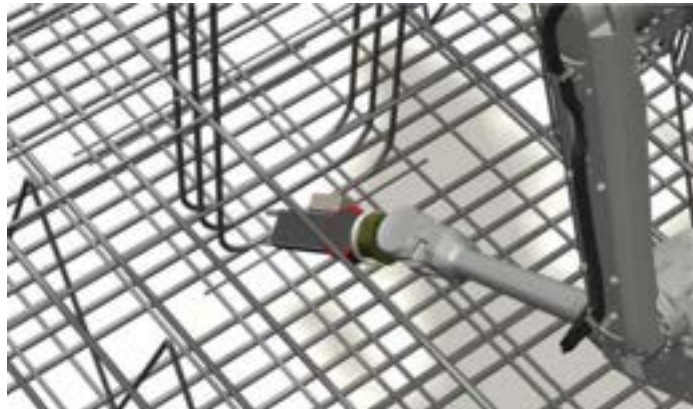


Figure 10 - Extreme case (Illustration from Robotstudio)

To be able to secure the bottom and upper rebars the tool will tie three rebars, collinear to each other, outside of the cage. This will result in a need of a large tying volume and size of the tie. The largest rebar combination is combined of two 25 mm and one 12 mm rebar.

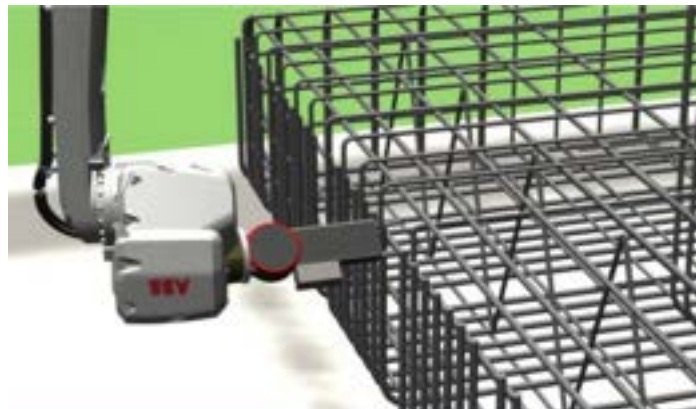


Figure 11 - Extreme case (Illustration from Robotstudio)

At one section of the cage the robots will tie some longer U-shaped rebars. This sequence will result in that the tools has to manage to perform a tie to a three-dimension intersection point. The sequence can be seen in figure 12 below.



Figure 12 - Extreme case (Illustration from Robotstudio)

Some restrictions for the tool is also from the situations when there is a need for the tool to grip and carry rebars to help the other robots with the load from long rebars. This situation can be seen in figure 13 below. This lead to some dimension restrictions, the tool will grip the rebar with an angle which makes the design for the grip function much more complex.



Figure 13 - Extreme case (Illustration from Robotstudio)

Conclusion

The study of the process resulted in a number of restrictions and design specifications for the desired tool. For example, the most time effective assembly process will be performed if the tool will be able to grip and hold rebars as well as to tie multiple rebars at once. The study also made it possible to identify size and design restrictions.

When building a rebar cage with more than 1800 ties, and a wire length per tie of 600 mm for the TJEP XP25, this would result in the use of more than 1 km wire in the process. Therefore, it was established that an external spool for wire was needed to minimise the required volume of the tool as well as maximise efficiency. Orientation of some of the vertical positioned rebars contributes to the importance of tightness and strength of the tie as a factor. Another important factor is the strength and durability of the tool as a result of the strain that occurs when gripping and moving some of the heavier rebars.

The study of the process resulted in the discovered of some more problematic issues. The simulation assumes that the rebars always are in a perfect state and absolutely straight. This will not be the case since the automatic rebar straightener and bender is not designed to perform high precision jobs. The study also revealed that the tool must have a rigid structure and manage high loads and in the same time be as small as possible.

4.2.2 Function Analysis

As a result of the study of the process flow, the authors structured a function analysis with the aim to define the main, sub, part, and support functions of the product. All functions were first structured in a function list and then visualised in a function tree to see the dependencies between functions of the product.

During the automated tying process for the ARCAS the tools must be able to perform several tasks. The main function of the tool is that it must enable an automatic tying process. This results in that the tool must both be able to grip the rebars as well as to tie them. With the grip function the tool will help divide the weight between the robots which will prevent undesired bending of the rebar, and at the same time the tool must allow rotation and linear movement of the rebar.

The two sub-functions result in a number of part functions, named p_1 , p_2 and p_3 in the table. This can be seen more clearly in the function tree, figure 14.

Table 1 - Function list

Function list	
Enable automatic tying process	M
Handle rebars	S
Tie rebars	S
Tie and tighten wire	P_1
Grip rebar	P_2
Hold rebar	P_1
Allow rotation of rebar	P_1
Wind wire around rebar	P_2
Allow linear movement of rebar	P_1
Apply force	P_3
Feed tying wire	P_3
Withstand demanding wether	Su

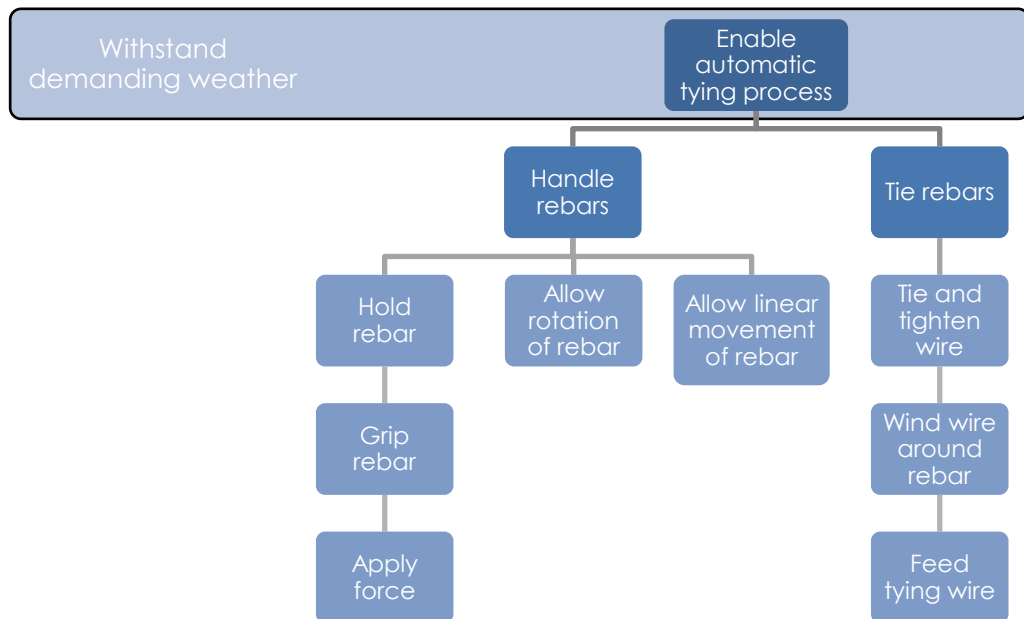


Figure 14 - Function tree

4.2.3 Situational Analysis

The construction industry has in contrast to other industries in Sweden a long-term tradition to be retrogressive to the development of new innovations. This has resulted in that many companies nowadays struggles internationally with the competition from external construction companies.

Today one of the most primitive tasks done at the construction sites is the tying process. Although there are many tying machines on the market that are there to simplify and rationalise the process, the machines are not used in such extent as they could be. A reason for this may be the limitations some of the machines may have (Sandberg & Hjort, 1998).

Even though the aim for this thesis is not to develop a new tying tool for construction workers, the main functions for the hand-held tying tool and the robot tying tool are the same, and the problems that the machines on the market today may have, has to be identified. Therefore, a key part of the product definition phase was to study and evaluate the functions of the tools that can be found on the market and identify their strengths and weaknesses. This phase also included the semi-structured interviews that were conducted in the project as well as a visit at Atlas Copco Construction tools located in Kalmar. This is the summary of the situation analysis and the interviews and observations that can be found in appendices B and E.

Automatic rebar tiers

There is a wide variety of companies that manufacture rebar tiers today. Most of these are sold directly to construction companies and therefore, the information that can be found on the internet is limited. Extensive research had to be made to find information about each machine or contact with people in the business to find specific machines.

An evaluation was made to find similarities in each design and all concrete factors are being presented. Most of the data is specified by retailers or manufacturers for each model.

Table 2 - Study of rebar tiers

Factor	DF16	XP 58	BNT-64	Rebar Pro	Knut 39
Wire guide	Fixed guides	Fixed + flexible guides	Two flexible guides	-	Two fixed guides
Storage of wire	Strip	Spool	Spool	Coil	Spool
Type of wire	Clips	Continuous	Continuous	Clips	Continuous
Weight [kg]	2.2	2.4	3.8	6.2	4
Dimensions [LxWxH mm]	656 x 164 x 118	310 x 100 x 290	660 x 80 x 180	1050 x 260 x 200	-
Knots per wire load [no]	77	90 - 100	120 - 200	100	-
Tying cycle [sec]	Approx 0.8	0.9	1.6	0.8	1.5
Wire dimension [mm]	1.1	0.8	1.2	-	1.5
Rebar dimension [mm]	16 + 16	58	32 + 32	15 + 15	39
Factor of consistency [Low-High]	Medium	High	High	Medium	High
Durability of knot [Low-High]	Medium	High	High	Low	High
Factor of failure [Low-High]	Low	Low	Medium	Medium	Low
Need of second operation	Yes	Yes	Yes	No	No

After studying and evaluating information about each tying machine and its tie, four factors could be assessed. These factors are: consistency of each tie, durability of each tie, chance of failure in the tying process and the need of a second operation in the tying process.

Three of the presented tools uses continuous wire to tie the rebar that is stored on a spool that is loaded into the machine. To guide the machine in to place, different types of guides are used depending on application.

A major issue with having a spool of wire directly on the machine is the increase of weight and size. If tying wire can be stored in a separate unit, the weight of the machines can be lowered.

Two tools stand out from the majority, for example the BNT-64 is a model with a jaw that opens and closes during the tying process. This replicates a function that is desired on the robotic tying tool, which is the ability to grip and move a rebar. Apart from the other machines that are issued with spring-loaded or fixed jaws the BNT-64 opens and closes its jaws before and after the tie is made.

The Knut 39 from Atlas Copco is a tying machine with a knot that differs from the others regarding the design. The machine makes a small knot with a height of just 5 mm. This eliminates the need of a second operation, which today is one of the reasons that tying machines are not as used at constructions sites as often as they could be.

Automatic tying tools that are exact copies of the MAX as well as the TJEP have been found on a number of websites and on the most part these are being sold in Asia. If the reason for this is a result of plagiarism, or if this tool and tying procedure is far superior to other tools is not certain and will not be investigated further in this work.

Interviews

The interviews focused on how automatic rebar tiers are being used by Skanska and other construction companies today, with the purpose to gain understanding of the strength and weaknesses of these machines. This is a summary of the interviews and the entire transcript can be found in appendix E. The interview questions and the transcript that are presented in the appendix are presented in Swedish to avoid losing or changing any of the given information.

Automatic rebar tiers are being used to a larger extent today than they have ever been, the main reasons for this are the advantages they have, both ergonomically and time saving, over manual hand tying. The machines of choice for Skanska are tools from MAX, such as the 397 and 398, and when tying larger size rebars the model 500 is used. Even though these types of machines are getting more common on the construction sites they still have their limitations which makes manual hand tying superior to the automatic rebar tiers. Rebar cages with limited space between rebars makes the machine redundant. Some rebar cage designs cannot be constructed using automatic rebar tiers due to the limited tightness and strength of the ties. It is most commonly used when constructing foundation plates and bridge arcs.

Construction workers are doing simple tests to see if a tie is strong and rigid enough for it to be accepted in the construction. This is most commonly done by pulling or kicking the rebar to spot unnecessary movement. If a low-quality tie is detected it is either removed and replaced with a manual tie or simply, a manual tie is added as a complement. Bridge piers and walls are applications where the quality requirements on the ties are at its highest. To improve quality of the concrete, the casting mould is shaking when concrete is being poured on top of the rebar cage. This process puts high loads and strain on the rebar cage as well as the ties, making yet another reason why the ties must be tight to form a rigid construction.

MAX rebar tier is the tool of choice at Ramirent in Västerås. The main reason that this tool is serviced and repaired is misuse by the construction workers. This results in unnecessary wear on the components of the tool.

Moisture and dust have negative impacts on the tool and are considered the most common reason of failure except direct damage from tool misuse. MAX is designed with a narrow canal, in which the tying wire travels during the tying process. Dust, mud and other particles may get caught in this canal and this will hinder the wires possibility to wind around the rebar. The complex electrical system is easily affected negatively by moisture and rain. An electrical failure results in a disabled machine.

Other common types of failure are wear on the automatic braking system which brakes the rotation speed of the coil. If the brake is worn out the coil will rotate faster than intended and tangle will most likely occur.

According to the suppliers some of these failures can be avoided by using a special lubricant that is supplied by the manufacturer. But due to misuse of this lubricant, a misuse that does more harm than good to the machine, Ramirent has made the decision to not supply construction workers with this lubricant. The MAX is also issued with a jacket, a protective cover that shields it from rain and dust. Construction workers dislike this type of protection, they mean that it feels awkward and makes it harder to use.

Observations

Atlas Copco Construction Tools is a company located in Kalmar. The company designs, develops and manufacture hydraulic, pneumatic and petrol powered power tools. The aim of the visit was to be presented to the Knut 39 which is a new rebar tying machine that they are currently developing and testing in Kalmar. Knut 39 is the only rebar tying tool that is currently being manufactured in Sweden and thanks to contacts at Robotdalen this proved to be a perfect opportunity for a meeting. This gave the authors an insight in the development process of a handheld tying tool and increase the understanding of the functions of such tools. The documentation of the visit in full is presented in appendix E.

When looking at the tool it looks like it has a bright future on the market for hand held rebar tiers thanks to its well-designed functions and innovative design. It has a number of features that could easily be adapted to work with a robot thanks to the communication and electrical system.

4.2.4 Practical Laboratory Tests

The future ARCAS will be revolutionary for bridge construction and eventually for all large-scale construction of rebar cages. This will also result in a reformation of construction guidelines and framework regarding rebar cages. For example, the construction engineer will have to focus on higher loads for both the whole cage as well as on each knot. Skanska do not have any standard methods for quality and strength control of the rebar cages at this point. Neither do the tying machines that are currently used come with information regarding values of strength and durability of ties. This means that all quality controls rely on the experience of the construction workers. With this in mind, practical laboratory tests were carried out with the aim to get the best quality first-hand information about the strength and quality of knots made by commercially available tying tools. These tools are approved to be used for rebar cage construction, so the test information could then be used to find concrete values for a technical specification. The tests were done by using a Galdabini Quasar 100 tensile strength test machine at the material lab at Mälardalen University in Eskilstuna.

Five different kinds of tying machines were used during the tests, some of which are used by Skanska as well as the new Knut 39. These machines are:

- MAX RB398
- MAX RB655
- MAX RB517
- TJEP RE-BAR 25 XP
- Knut 39

The result of the practical laboratory tests was later used in the development of the technical specification as well as in the conceptual design process. The entire documentation of the tests can be found in appendix D.

The major discovery that was done during the testing phase is that the knot itself has little impact on the total strength of the joint. Tests that were carried out showed that a simple hand tie had the strength similar to the one tied by the MAX RB517 but totally different characteristics even though the exact same wire was used. The difference in characteristics are due to the technique used to finish the tie. When tying by hand only

the end parts of the wire were twisted together apart from the machine tie that twists the entire bundle of wire to form a knot.

A difference that was found when testing the RB655 was that the major limitation for the tying machine was the strength of the tie itself and not the wire. At around 800 N the ties began to unwind and continued to unwind until failure.

Safety limit describes the relationship between load and deformation from the first wire break to complete tie failure. Safety limit is a way to show the difference between different types of knot designs concerning strength and deformation. Top knot ties were proven to have a higher safety limit than end twist ties even though they had the same value for the first wire break.

When analysing these test results, it was clear that the wire broke before the tie itself. This led to the conclusion that the wire strength is one of the factors with the highest impact on the strength of the joint. Evaluating test results of different tying techniques made it clear that the number of times that the wire was wound around rebars have a bigger impact on the overall strength than the design of the tie itself. The reason for this is that the friction between wire and rebar is high enough to evenly distribute tension in the wire.

Another interesting aspect that was examined during the laboratory test phase was the amount of wire used by each machine to complete a knot. When looking at the knots there were some major differences.

MAX RB517 uses 1400 mm of 0,8 mm tying wire for a knot that is wound four times around the rebar. This specific method of tying had a limit of failure with a mean value of 1711,8 N. Comparing this tying method with the RB655 that uses a 1,5 mm wire and only wounds it once around the rebar a major difference can be seen. RB655 only requires 210 mm of wire to complete a knot, but a major drawback is its limit of failure with a mean value of only 1069,9 N.

The information that can be seen as the most positive was observed when measuring the amount of wire required to make a hand tie. By wounding 0,8 mm tying wire four times around two rebars and making an end twist tie a limit of failure with a mean value of 1781,9 N was achieved by only using 600 mm of tying wire. This information shows that the end twist method achieves higher limits of failure compared to the MAX RB517 and still using only roughly 42 percent the amount of tying wire. So, by using an end twist tying method savings of 58 percent can be done. By applying this method to rebar cage construction economic, environmental, and weight savings can be made.

The authors have come to the conclusion that a large-scale investigation has to be conducted to find specific values that rebar ties must be able to withstand for the new ARCAS cage designs. A number of factors regarding cage design are currently unknown and might come to change during the process of developing the ARCAS resulting in a large number of obscurities. But since rebar tying tools are commercially used, their limit of failure is considered to be a valid target value for the product specifications in this project.

4.2.5 Reverse Engineering

Reverse engineering study was conducted by disassembling a TJEP XP25 machine that helped the authors gain knowledge of a tying machine and its functions at a component level. The study consists of a visual summary from the disassembly and is presented in appendix C.

The most important discoveries made during this phase were the solutions for winding wire around the rebar, making the tie as well as feeding of the wire. One finding that proves the complexity of the product is the wire path used to guide the wire internally in the machine. Information given by Ramirent about easy wire jam was proven valid from the practical laboratory tests and it was understood why it would so easily jam after the reverse engineering.

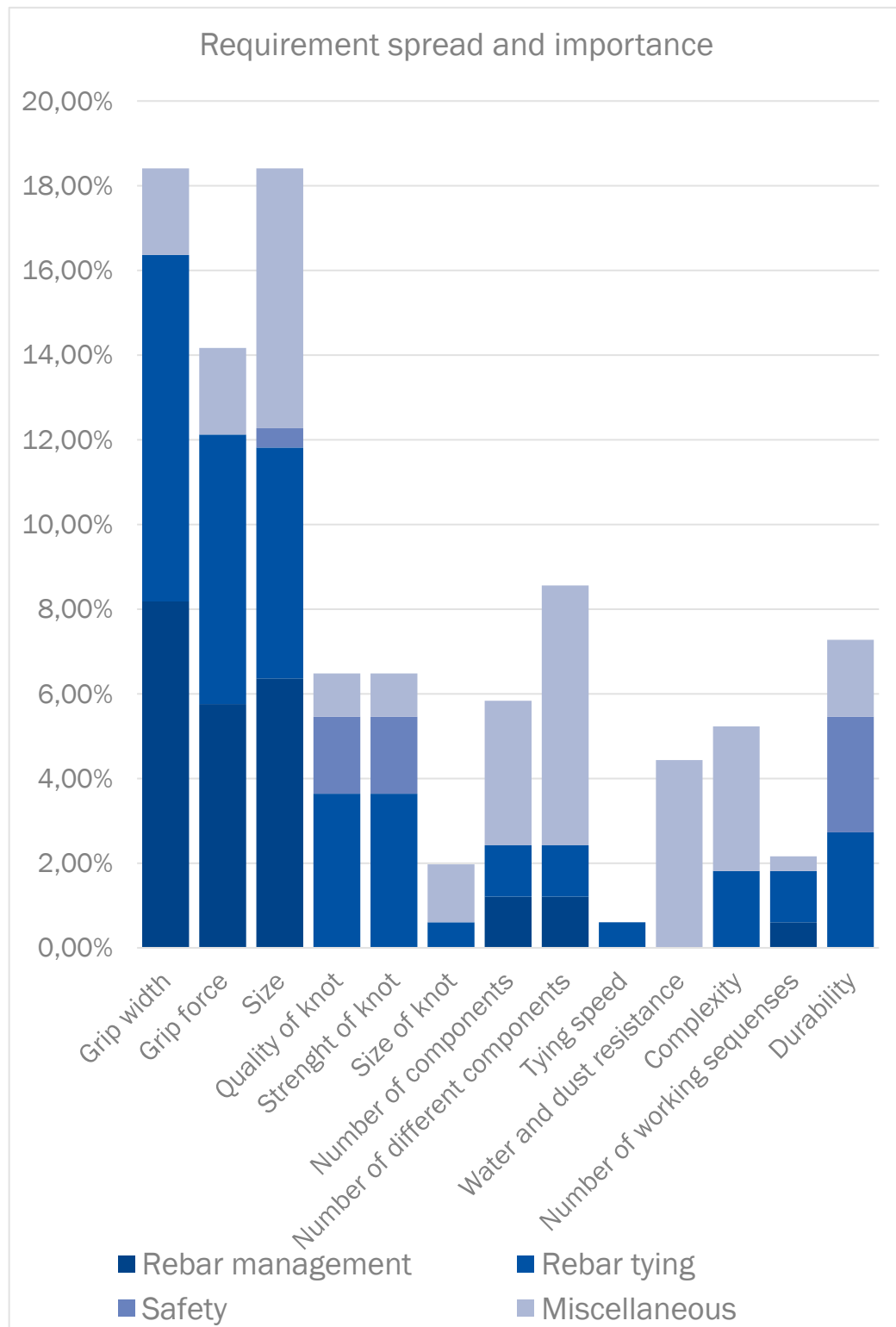


Figure 15 - Internal functions of a TJEP XP25

4.2.6 Quality Function Deployment (QFD)

By using a QFD the needs presented by Skanska and Robotdalen could be translated in to characteristics in the form of technical requirements with measurable values. The customer needs were weighted according to their importance, and the influence that a characteristic had on a customer need was evaluated in three levels, low, medium and strong or 1,3 and 9. These were then used to calculate the importance of each requirement when it comes to developing a successful product. The data presented in the QFD resulted in a number of conclusions. The QFD is presented in a House of Quality with the relevant matrices and can be seen in appendix F.

Table 3 - Chart describing the requirement spread and importance found in QFD



The chart above shows the requirement spread and importance found in the QFD. As illustrated in the chart, the *Gripping width* and the *Size* of the tool are the technical characteristics that turned out to have the most influence on the customer needs. These two, together with the *Gripping force*, account for roughly 51 percent of the total weighted influence.

The customer needs related to the tying process are the ones that are most dependant on the technical requirements of the product. A bit over 37 percent of all the weighted influences are related to the tying process.

Some values, such as the tying speed, are not given a high value in the QFD. This only implies that it is not an important requirement to fulfil the customer needs. But it is a requirement that will have an important role when developing the theoretically best product.

4.2.7 Engineering Requirements

The technical specifications are based on the customer needs presented by Skanska and Robotdalen. The needs for the tool were developed with the help of a QFD and the values acquired during from the interviews and during the laboratory tests.

Key specifications and functions are presented with their respective target value in the list below. A table of all technical specifications can be found in appendix G.

- A grip diameter of 32 mm is required to fully grip all kinds of rebars.
- Provide a grip force that can lift and hold the largest rebar with a weight of 20 kg.
- The size of the tool cannot exceed 600 x 80 x 150 mm.
- The tool must have a tying width minimum of 100 mm.
- The tool must have a grip width of minimum 52 mm.
- Tie quality must be consistent to guarantee safe usage of tool.
- The strength of the tie must be greater than 1000 N to assure a sturdy assembly.
- The weight of the tool must be less than 20 kg.
- Number of components must be as low as possible to minimise cost, weight, and size.
- Number of different components must be as low as possible to increase manufacturability and maintainability.
- The tool must be able to withstand water and dust from a demanding working environment.
- The complexity of the tool design must be as low as possible to lower manufacturing cost and enable high maintainability.
- By demanding low number of working sequences the lead time can be minimised.
- One of the main reasons for the tool is to eliminate the human factor, thus no human interactions are allowed.
- The tool must be able to withstand the demanding working environment.
- The tool must not be negatively affected by temperatures between – 20 to 40 degrees.

4.3 Conceptual Design

This chapter includes the concept generating phase of the thesis work and the selection of the final concept.

4.3.1 Generating Concepts

The information gathered in the concept definition phase was used to break down the functions from the function analysis and to specify three focus areas of the robotic tool that are crucial to meet the main function of the product. First of these focus areas is the ability to grip and hold the rebar, the second is how to wind the tying wire around the rebars. The third and last focus area is how the knot will be designed, both in durability and shape.



Figure 16 – Example of straight knot, topknot and flat knot

Idea generating sessions were held to come up with as many technical solutions to these focus areas as possible, this was done using the method of *Brainstorming*. This resulted in a number of solutions for each focus area that later were combined into a total of 240 different concepts. A majority of these were eliminated due to high complexity and that some ideas only are a solution on their own, and not in combination with other ideas. After the elimination process, 240 concepts were reduced to 11.

Table 4 - Concepts from brainstorming session

Concept	Grip and hold rebar	Wind tying wire	Design of knot
1	Vice	Standard guides	Topknot
2	Claw	Two movable interlocking guides	Straight knot
3	Forest harvester head	Standard guides	Top cut knot
4	Claw	Two movable interlocking guides	Flat knot
5	Spring loaded plier	Sewing machine	Flat knot
6	Polygrip plier	Two movable interlocking guides	Straight knot
7	Claw	Standard guides	Topknot
8	Claw	Standard guides	Straight knot
9	Forest harvester head	Movable guides	Topknot
10	Polygrip plier	Movable guides	Straight knot
11	Vice	Standard guides	Flat knot

4.3.2 Concept Selection

After the elimination process a total of eleven concepts were ready for an evaluation process. By using a Pugh's matrix, the concepts were evaluated by comparing their performances and characteristics against a datum. The criteria on which the evaluation was conducted were based on the customer requirements presented in the House of Quality and the Function Analysis. The technical criteria were given a value according to their importance to the customer as well as the relevance to fulfilling the functions.

Table 5 - Pugh's matrix

Criteria	Importance 1 to 5	Concept number										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Complexity	4	1	0	1	0	-1		-1	0	-1	0	1
Grip force	4	1	0	0	0	-1		0	0	0	0	1
Grip flexibility	5	-1	0	0	0	-1		0	0	0	0	-1
No. Of custom parts	2	0	0	-1	0	-1		0	1	-1	1	0
No. Of work sequences	3	-1	0	0	0	-1		-1	1	-1	1	1
Size of knot	4	-1	0	0	1	1		-1	0	-1	0	0
Quality of knot	5	-1	0	0	1	1		-1	0	-1	0	0
Reliable rebar management	5	0	0	0	0	-1	Datum	0	0	0	0	0
No. Of Working elements	2	0	0	0	0	-1		0	0	-1	0	0
Accessibility	5	-1	0	-1	0	0		0	0	-1	0	-1
Plausibility of extreme cases	4	-1	0	0	0	0		-1	0	-1	1	0
Maintainability	2	0	0	0	0	-1		0	0	-1	0	1
Reliable wire path	5	-1	0	-1	0	-1		-1	-1	-1	-1	-1
Sensitiveness to environment	3	0	-1	1	0	0		-1	1	-1	0	1
Fix rebar in place	1	1	0	-1	0	-1		0	0	0	0	0
Adjustability of dislocated rebars	5	-1	0	-1	0	-1		-1	-1	0	0	0
Weighted total		-27	-3	-11	9	-29		0	-33	-2	-39	4
Unweighted total		-5	-1	-3	2	-9		0	-8	1	-11	2
Number of +		3	0	2	2	2		0	0	3	0	5
Number of -		8	5	5	0	11		0	8	2	11	5

Four of the concepts ended up with a similar score compared to the other remaining six. Number 4 was the concept with the highest score followed by concepts 6, 10 and 11 that got similar scores. These four concepts proved to be very much alike when it comes to the solutions for the three focus areas. The solution for gripping the rebar is either *claw*, *polygrip plier* or *vice* solution. To wind the wire around the rebar two of the concepts uses *two movable interlocking guides*, the design of the knot is either a *straight knot* or a *flat knot*.

By analysing the matrix further, a number of factors were revealed that confirms the result. For example, criteria where the four with the highest score got the same result, the others concept always got a lower score. These criteria were also of high importance.

The results from the Pugh's matrix are only combinations of technical solutions and not in any way fully defined or designed, thus more thorough concepts were developed to further define the concepts. This stage resulted in nine concepts based on the winning combinations from the Pugh's matrix. All these concepts were visualised with the help of SolidWorks. These concepts, together with descriptions are presented in Appendix H. The visualisations are presented in a simplified wireframe model to prevent early conclusions from being drawn, such as specific materials and design choices.

By taking the engineering specifications as well as the criteria from Pugh's matrix in account the concepts were evaluated during an open discussion with supervisors at Robotdalen and project owners at Skanska AB. As a result of this discussion, concept 8 was considered to be most suitable for further development.

4.4 Product Development

The final concept is designed with combined grippers and guides that will now be referred to as jaws. The jaws have a *polygrip plier* style design that allows handling of a rebar with an integrated wire path that allows the tool to wind the steel wire around the rebars. The concept is designed to use a *straight knot design*.

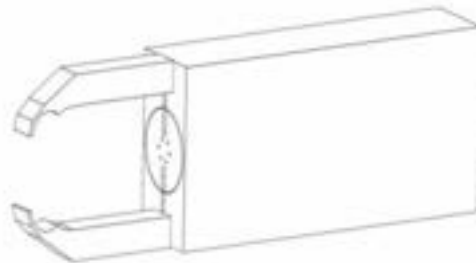


Figure 17 - Simplified concept visualisation

Up to this stage the main focus of the product development process has been to develop technical solutions for the three focus areas that were decided during the Conceptual Design phase. The focus of this chapter was finding and analysing all the technical aspects and solutions for the entire flow of energy and develop the concept into a functional product.

4.4.1 Components

To be able to develop the concept to a fully functional product there was a need to analyse the functions of the tool and identify essential components for each function. All necessary aspects for the components were taken in consideration and were thereafter used to select components and in some cases, design custom parts.

This chapter will present these components and the design process of each component, including calculations and design solutions. All the calculations are based on data from *Karlebo Handbok utgåva 15* (Bonde-Wiburg, 2000). In this chapter, only calculations that are used to describe certain cases or calculate key values are shown.

Jaws

To be able to fulfil the functions of the combined grippers and guides, the jaws are designed with both an open wire path that forces the wire to wind around the rebars, as well as a grip surface which will hold the rebar in place. The grip surface has a diameter greater than the one of the rebar, this will allow the rebar to move linear and rotate freely while being held by the robot tool. A reliable grip is crucial for a safe and successful product, thus the surfaces that are in contact with the rebar are required to be durable enough to withstand the load and movement from the rebars.

Pneumatic cylinders enable the jaws to open and close to grip and hold the rebars. These cylinders are placed on each side of the tying mechanism so that the linear force of the cylinders can be utilised. Pneumatic linear cylinders were the main choice thanks to their physical properties and that the robot can supply the tool with compressed air. Linear cylinders are simple compared to rotating motors in the respect that the number of moving components required to transfer force can be reduced.

There were several parameters that had to be established before a suitable cylinder could be chosen for the tool. First, the length of the jaws had to be established, the tool must tie rebars in different numbers and patterns, this result in that the distance between the jaws must be at a minimum of 100 mm. With a margin of safety, the length of the jaws was chosen to be 120 mm. These dimensions give a grip angle of 24.6 deg.

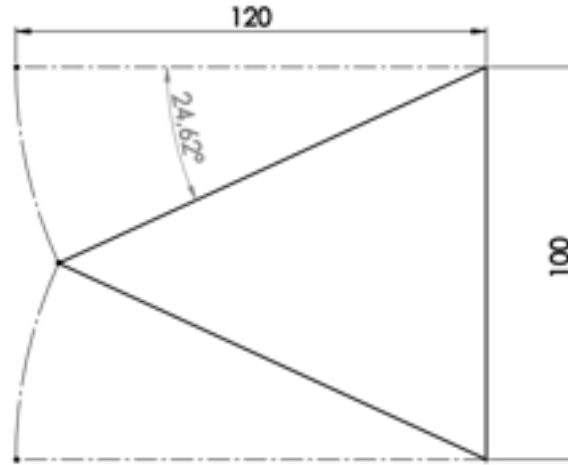


Figure 18 - Illustration of estimated angle

The width of the jaws was restricted by the dimensions of the area around crossed rebars. This information was retrieved by studying the rebar cage construction in Robotstudio. With a distance between the jaws of 100 mm, this resulted in a maximal jaw width of 30 mm.

To find a cylinder that could provide enough force to secure the rebars, a research study of all the forces acting on the rebars was conducted. A coefficient of friction (μ) of 0,18, based on Karlebo handbook page 53, was used to calculate a realistic force required to hold the rebar. An equilibrium state was created to find the relationships between the rebar, the jaws and the forces acting upon them. The equilibrium state contains three acting forces where mg is the gravitational pull of the rebar acting on the jaws, N_y is the component of the reactional forces from the gravitational pull acting in the opposite direction of mg . The component of the force of friction acting against mg is called $F\mu_y$.

$$\sum F_y = 0 \rightarrow mg - 2N_y - 2F\mu_y = 0$$

$$F\mu = N * \mu$$

The force of friction is in a direct relationship to the force perpendicular to the surface (N) where the force of friction ($F\mu$) is acting. This relationship and the equilibrium state was used to find the force N required to hold the rebar in place. The required force N was calculated to be 181,3 N, and with a jaw length of 120 mm the torque was calculated as follows.

$$M = F * L \rightarrow 181,3 * 0,12 = 21,8 \text{ Nm}$$

When having a value of the required torque it was possible to calculate the force needed from the pneumatic cylinder. The design of the jaw gives the cylinder 40 mm of leverage. This leverage is used to calculate the cylinder force needed.

$$M = F * L \rightarrow F = \frac{M}{L} = \frac{21,8}{0,04} = 545 \text{ N}$$

These steps show that a cylinder capable of producing a minimum of 545 N of force is required to grip and hold the rebars. A compact cylinder ADN from *Festo* was selected with the help of all the known parameters. The cylinder is double acting with a theoretical force of 754 N. A margin of safety is substantial to assure safe rebar handling, thus a margin of safety of 1,4 was considered sufficient.

Cylinder stroke length is the distance that the piston travels between on and off state. With a grip angle of 25 deg and a lever arm with a length of 40 mm there was a need for a stroke length of 15, see figure 19, to give the required grip angle of 25 deg. This data made it possible to find a specific cylinder model, Cylinder ADN-40-15-A-P-A. Full data sheet for the cylinder will be presented in appendix J.

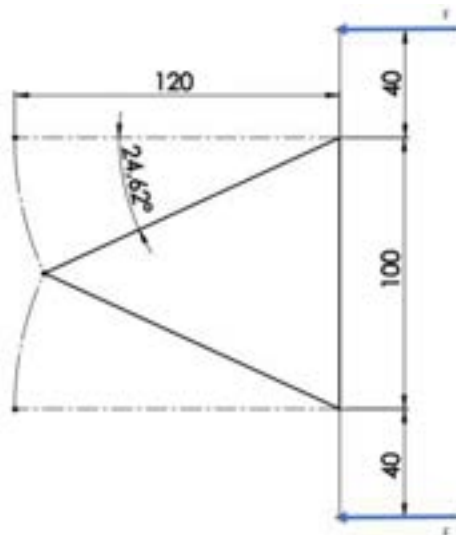


Figure 19 - Illustration of cylinder forces on lever arms

On the cylinder rod, a standard rod clevis from *Festo* is attached, this is then mounted on the gripper jaw to transfer the pneumatic force. Due to the circular path of the rod clevis that occurs during the gripping process the back of the cylinder is attached on a movable bracket. For this application, standard swivel flanges from *Festo* are being used. The swivels are attached to the cylinders and are mounted on custom designed brackets on the tool. The data sheets for the rod clevis and the swivel flanges are also presented in appendix J.

Tying function

To begin with the development process of the tying function it was necessary to further analyse the tying process itself. With the information gathered during the product definition phase a process flow could be created. The steps of the flow are as follow:

1. The wire feeds through the tying mechanism and around the rebars.
2. The wire blocks grip the front end of the wire.
3. The wire is reversed to tighten around the rebars.
4. The wire is cut.
5. The wire blocks grips both ends and rotate to make the knot.

During the development of the tying mechanism many aspects had to be taken into account. The process of working with the situational analysis established that the knot designs that were tied by tools that are commonly used today are unsatisfactory, both to the construction workers and when looking at their design and tightness. The straight knot that was chosen as the winning concept during the concept selection process was proven to be superior to the others thanks to its simplistic design and high durability.

The process flow reveals several problems that the tying part of the tool will have to solve. When reversing the wire to tight it around the rebar the front end of the wire must be locked in place to prevent it from retracting into the tool. This creates the need of a gripper unit that can hold one end of the wire. In the making of the knot itself there is a need to lock both ends of the wire in place to ensure a tight and rigid knot. This creates the need of a gripper that can hold both ends of the wire. This was solved by using a design that takes advantage of a bi-directional rotation to provide two separate gripping functions.

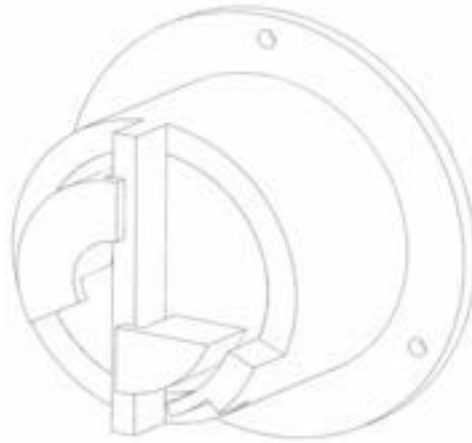


Figure 20 - Simplified illustration of tying mechanism

The process of creating the knot itself is executed by gripping the wire ends and then rotating them around each other. To wind the wire ends around each other the outer part of the wire head has to rotate, this was solved by using an electromagnetic clutch that is mounted on the motor axis that allows the inner part to rotate independently and when it is needed, rotate the outer part together with the inner part.

There was also a need to cut the wire prior to the knot being made. To reduce the number of components and improve the efficiency of the tool this was solved by using the outer part of the wire head to cut the wire when the rotation starts. So instead of using three separate motors for gripping, rotating and cutting, all three functions were solved by using only one motor thanks to innovative design by using smart components.

The components needed for the tying mechanism were chosen with the result from following calculations:

Steel wire with a diameter of 1,5 mm have a cross section area of 1,77 mm². Lack of information about the steel wire lead to the estimation that the steel wire used have a low strength to cutting due to being believed to not be a high tensile strength steel. Steels containing 0,1-0,2 % carbon have a cut strength of 250-390 MPa, after discussions a value of 350 MPa was chosen.

The force needed to cut a wire depends on a number of factors, such as shear angle and material properties. There are many ways to calculate shear and cutting of materials. This calculation uses the thickness of a steel plate, the shear strength, and the shear angle. Even though this specific formula is used to calculate the cutting of steel plates, it can be used for circular cross-sections where the only difference will be slightly higher force than required.

$$F = \frac{t^2 * k_s}{2 * \tan \lambda} = \frac{1,5^2 * 350}{2 * \tan 60} = 227,3 \text{ N}$$

The force needed to cut the wire was then used to calculate minimum torque required by the twister motor.

$$M = F * L = 227,3 * 0,024 = 5,5 \text{ Nm}$$

The process of tying the knot and cutting the wire could not take more than 1 second to complete, and a knot that would provide enough strength to pass durability tests requires to be rotated at least 6 times. This means that the wire head must have a rotational speed of 360 rpm.

A motor model RE 50 and gearbox model GP 52 planetary gearhead from *Maxon motor* was selected. These two components produce a speed of 378,67 rpm and a torque of 6,08 Nm.

The clutch chosen for the application is a high torque design EM clutch from *Ogura*. The clutch will handle static torque up to 7 Nm and a speed up to 7000 rpm. This type of clutch was suitable due to the relative high torque and space efficiency. The tying mechanism will be mounted to the tool using the components' mounts. To keep the rotating outer tying component in place there was a need of a ball bearing which will allow free rotation without wear.

Wire components

For a clean and effective tying process the wire path must work flawlessly every single time. A smooth and durable wire path substantially decreases the risk of issues regarding feeding of wire. The path deciding the radius of which the wire will wind around the rebar affects the force required to feed the wire. The wire path is intended to be integrated in the external tool body design in a durable material.

The speed and force of which the wire is fed and wound around the rebar is decided by the wire feeder. It is placed so that it avoids unnecessary bending of the wire prior to the tying process itself. The design of the wire feeder resembles the most common used in tying tools today, a motorised gear drive, which can be seen in chapter 4.2.5, Reverse Engineering.

To find components for the feeding of the wire a maximum time to wind wire around the rebar was estimated to around 1 second. The total length of the wire that had to be fed during this second was calculated to be around 500 mm with the current jaw design, meaning that the speed of the wire has to be 0,5 m/s. A set of feeder gears with a diameter of 20 mm was chosen.

These parameters were used to calculate the speed that was required to be delivered by a motor.

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{0,5}{0,01} = 50 \text{ rad/s}$$

$$n = \frac{60 * \omega}{2 * \pi} = \frac{60 * 50}{2 * \pi} = 477,5 \text{ rpm}$$

The feeder gear needs a rotational speed of 477,5 rpm to generate the wire speed required. A DC motor with a gearbox was selected, EC 45 from *Maxon Motor*. This motor together with a gearbox, GP 42, delivers an outgoing speed of 513,3 rpm. The motor is connected to the driving feeder gear and the second feeder gear is driven. By mounting the driven gear to a spring-loaded lever, it will keep constant pressure on the wire to increase friction between the feeder gears and the wire. Component specifications as well as the needed custom designed parts can be seen in appendix J.

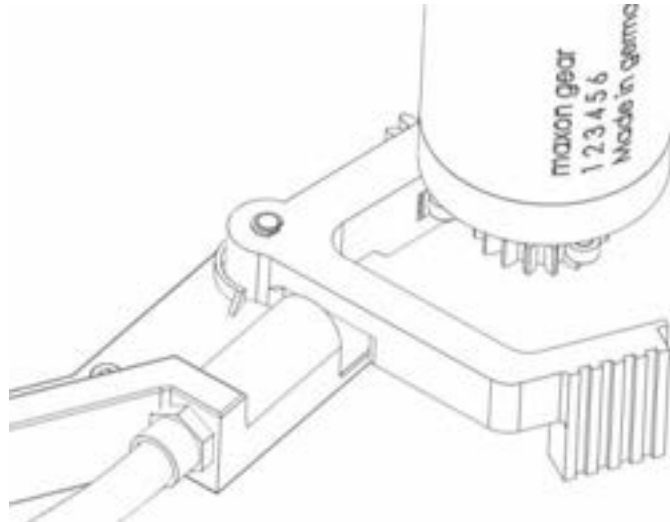


Figure 21 - Wireframe illustration of feeder mechanism

Tool attachment

During the study of the process it was identified that there was a need of external wire storage. This wire will be fed in a way similar to the feeding system used by welding robots. Using this kind of tubing makes a swivel redundant due to the limited possible rotation of the tool. This resulted in the use of a tool changer combined with a tool attachment, TA100-8E, from *Robot System Products* (rsp). The attachment has 4 pneumatic and 8 electrical channels and is designed to fit in a tool hanger.

Sensors

Sensors are used in the tool to get values and find important parameters used to communicate with the robot and the base unit for the ARCAS. Proximity sensors are located on the pneumatic cylinders, model SMT-8M from *Festo* are used to find the exact location of the cylinder piston.

Encoders and controller

Encoders and controllers were only chosen out from *Maxon motors'* recommendations to show size and placement in the tool, therefore, no specific models will be presented.

Encoders for each electric motor are placed at the back of the motor, it tells the system important data, for example, current angular position and speed. This information can then be used to confirm the success of a knot and if the system runs out of tying wire.

A controller is often used in complex systems to control electrical components. Its main purpose is to control the sensors, motors and encoders used in the system. *Maxon motors* recommends a digital positioning controller for this type of system.

Miscellaneous

There are several components that are needed in the system but not belonging to a specific category. Those components are presented below.

All the electrical components need electricity and electrical signals, and the pneumatic cylinders are in need of compressed air to work. Electrical cables run from the tool attachment to all the electrical components and tubing transferring air runs from the tool attachment to each cylinder. Appropriate tubing and cables were chosen according to the specifications of each component.

To protect internal components from water and dust, rubber seals have been added according to the chosen IP-Code, IP44. An IP-Code is a protection marking classifying the degree of protection against intrusion from media, such as hands, dust, water and

dirt. This specific IP-code classifies that the tool shall be protected from interpenetration from objects larger than 1 mm in diameter and spray proof with a pressure of 100 kPa.

Due to the design of the wire path and the rotating tying mechanism, some components will be exposed to the external environment. Areas around external moving components are hard to enclose against dust and water. To shield the internal components at the wire head, a radial oil seal TRA from *Trelleborg* is used, the design of the seal allows reliable tightness during high rotation speed of the tying mechanism.

The area around the jaws has large gaps between them and the external body by the reason of them being movable. There is no known standard solution for this problem, so the external body will be designed to reduce the exposure to fluids and dust. The moving components will be issued with flexible rubber seals to add additional protection.

Remaining areas such as ports for steel wire, air hoses and where the different external tool body parts overlap each other regular seals will be used to accomplish the required IP-Code. The tool will be assembled with appropriate screws and fasteners.

4.4.2 Body Design

Design of the internal tool body was based on the placement of each component. Alternatives to keep each component in place were identified. An internal body was designed from the different mounting options. The internal body distributes the forces throughout the tool to reduce the stress on specific components and at the same time it acts as a base mounting unit for the tool that will carry and secure all the internal components. To make assembly of internal components possible the body was split in two parts. These halves are to be screwed together, securing several parts in between them.

The external tool body was designed around the internal body and all internal components. Design guidelines used when designing the external tool body was about encapsulating all the internal components and shield them from the environment but keep the outer dimensions to a minimum to ensure accessibility inside the rebar cages.

4.4.3 Evaluate Product

Failure Modes and Effects Analysis, FMEA

During the evaluation of the final concept a FMEA was carried out, this made it possible to identify possible flaws and find corrective actions. The functions and components of the tool were divided and individually analysed. Each potential failure was presented with a failure cause and failure effect, this was then used to calculate the risk priority number (RPN) with the failure rate, severity and detection probability that shows the priority of the failure. This chapter will present the most critical possible failures of the tool. The entire FMEA is presented in appendix I.

The component with the two highest RPNs is the wire head because of severity and low probability of detection for these failures. If the tool will be tying a loose knot and the torque sensors register the intended torque it will be hard to discover until the cage is lifted and a collapse occur.

Wire paths may be damaged by sharp edges on the wire as a result from cutting. This failure risk had a high RPN due to its high probability and low detection probability.

Most failures that can occur only results in an inability to execute a specific sequence, that in turn results in the inability to complete the process. This means that only a few number of failures will cause direct damage to the ARCAS or the rebar cage. The risk of direct human injury during the process is close to non-existent due to the fact that humans will not be allowed close to the ARCAS during operation.

Design for x, Dfx

The Dfx mindset and guidelines were used throughout the development process but the Dfx tools were most important in the evaluation process. Concept design features and functions were evaluated and improved by using the guidelines of each individual design tool.

Design for Maintenance & Assembly, DFM & DFA

The concept was designed with a base unit for mounting all the internal components. Using a base unit for mounting of internal components is recommended by Ullman to improve the ability of assembling a unit together (Ullman, 2010).

Integrating parts into multifunctional components will, according to Ulrich and Eppinger, reduce the total number of parts to very little cost (Ulrich & Eppinger, 2011). This resulted in a base unit acting as a mounting unit and internal body.

Variation of standard parts have been kept to a minimum to make it easier to assemble and perform maintenance tasks on the product. Screw sizes have been adapted to minimise the variation of dimensions, this in turn reduces number of different screws needed during assembly and maintenance.

This product will only be manufactured at small scale so functionality has been the main focus during the development process. But the transfer to production has still been considered during the design process. The number of custom components have been kept at a minimum to reduce the number of components that got to be manufactured.

The biggest custom parts are the mounting unit and the plastic case. The mounting unit will be produced in aluminum in a CNC mill and the plastic case will be manufactured using injection moulding. Most holes for mounting the internal components together are placed in one plane to make CNC milling easier. This also reduces the need to relocate the mounting unit during the assembly process.

Empty spaces that have no positive effect on the tool functions have been removed.

Design for Environment, DFE

Aluminum is the material of choice for the mounting unit, it has many environmental benefits such as low weight which reduces energy needed during transports, it can be recycled to save large amounts of energy and it requires less energy than steel during the manufacturing process (Sapa, 2009). A thermoplastic will be used to manufacture the case with the help of injection moulding. This type of plastic can be melted and recycled into other products at the end of the tool lifecycle.

Custom components with different materials are designed for easy separability to make recycling of components easier. Electronic standard components are kept to a minimum due to them having low separability and this in them being complex and expensive to recycle. The tying process is designed so that there is no need to cut more wire than necessary. Compared to other tying tools there is no waste. This reduces the total amount of wire needed for the construction of rebar cage.

Design for maintenance, DFMain

Design for Maintenance (DFMain) was applied to the final concept with the aim to make the product easier to maintain. This was needed since the tool will be exposed to a relative high wear with will result in a need of continuous maintenance.

The tool body is designed in such a way that maintenance can be done to a majority of the components by only disassembling the left back body. This will also allow easy accessibility to the feeder mechanism that is needed when reloading tying wire. DFA resulted in reduced variation of different components, this in turn makes the product

easier to maintain due to reduced variation of spare parts. The DFA also resulted in that the majority of the components will be mounted on the base unit and one side of the case with will result in that easy maintenance can be accomplished without disassemble the whole unit.

Units and surfaces that are exposed to wear will be designed in such a way that they will be easy to replace without the need of replacing unnecessary components. By manufacturing the base unit in aluminum there will be no risk for corrosion, this will in turn remove the risk of rust and reduce the areas of focus regarding the maintenance.

The process of loading new wire into the machine was considered complicated to manage alone. To simplify this process, a locking mechanism for the spring-loaded lever holding the driven feeder gear was designed and implemented. This was done to remove the need of a person holding the lever with one hand while manually feeding the wire in to the machine.

Finite Element Analysis

During the evaluation of the tool it was clear that some components will be subjected to high loads during operation. therefore, analyses were made to ensure the quality of the construction and make necessary improvements.

The analyses were done in SolidWorks Finite Element Add-in. To be able to ensure the quality of the result from the analyses, the mesh size was decided by following recommendations from *Computer Aided Product Development* course at Mälardalen University. A mesh size that gives a minimum of two elements at the minimum dimension of the component was chosen.

Internal tool body

By designing the tool body as a mounting unit for the majority of the components, it must take most of the loads that exists within the system. To guarantee that the design of the tool body will withstand the loads and stress a FEA in SolidWorks was utilised to find areas of risk in the design where tension and deformation could do permanent damage.

This analyse was set up with all the forces acting upon the tool base unit when holding a rebar. That is that gravitational pull of the rebar, the forces and reaction forces from the cylinders. Fixtures were added at the back of the tool body where it is mounted to the tool attachment, these can be seen as the green arrows in the pictures showing the results.

For this analyse an aluminum alloy, 6061, was selected as the material of the tool body. This aluminum alloy was chosen due to the material properties and the fact that it is commonly used in these type of constructions (Sapa, 2009). The yield strength of this alloy is 227 MPa¹. The result is presented in figures 21 and 22.

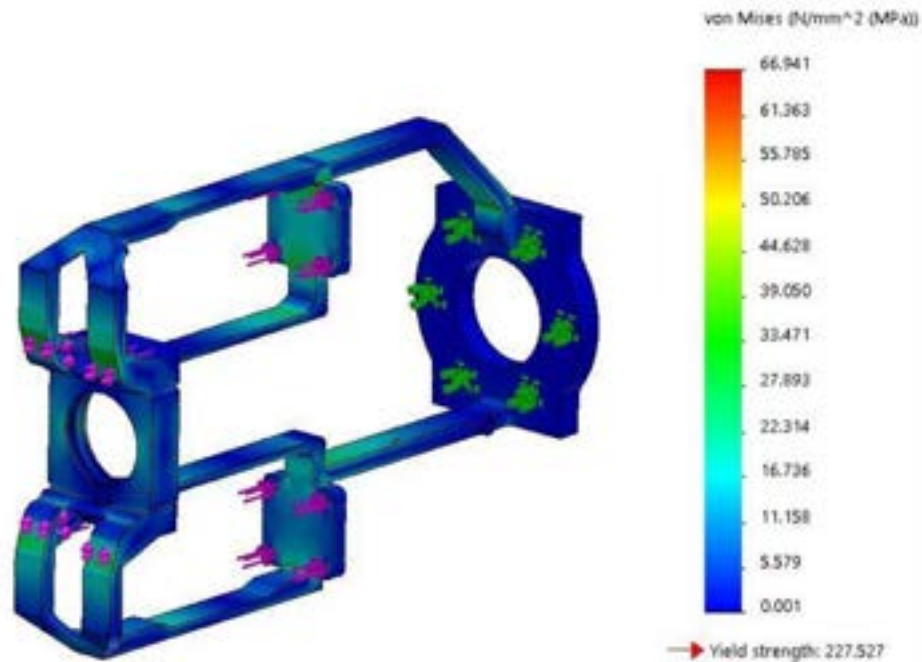


Figure 22 - FEA stress result of internal body

When studying the result it can be seen that stress up to 67 MPa develops in the mounting unit. All tensions are equally distributed throughout the material and no major concentration of stress could be found in the body.

Deformation analysis, figure 23, shows that the largest deformation that can be found during load occurs at the tools front with a deformation of 0,65 mm. This can be seen as a result from the high forces acting on the jaws. Values of stress are low compared to the yield strength of the material, but a deformation closing in on 0,7 mm may be considered high.

¹ Sapagroup (2016) Sapa Alloy 6061,
<http://www.sapagroup.com/pages/522574/Brochures/Sapa%20Alloy%206061.pdf>

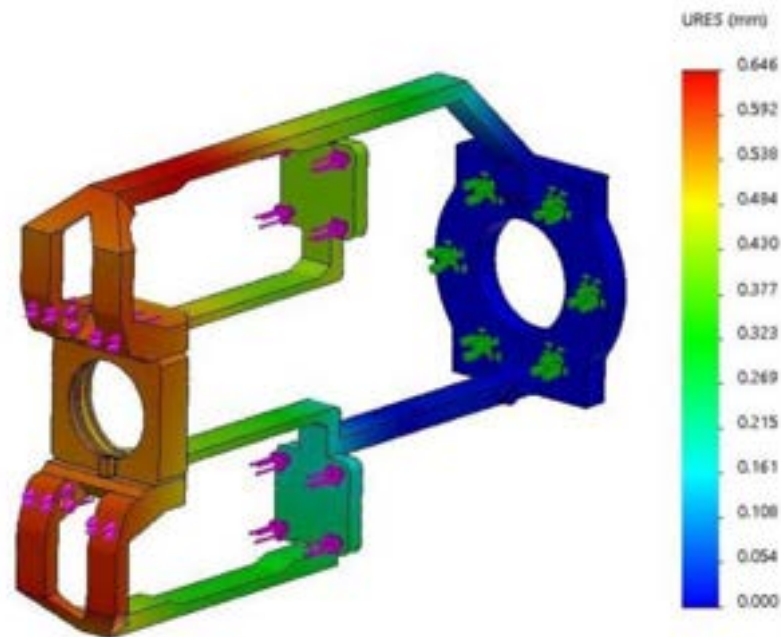


Figure 23 - FEA deformation result of internal body

With the current design and material, the body has a weight of approximately 1570 g. If a steel alloy were to be chosen it would have a weight of approximately 4500 g and this would only reduce the deformation down to 0,3 mm. When comparing the weight and deformation values of aluminum to the ones of steel it was clear that aluminum had a clear advantage. After discussions, comparisons and further analysis between other materials the choice was made to keep aluminum 6061 as material for the tool body. When mounting an external body to the internal tool body this will help support it and make it more rigid and in turn reduce bending.

Test results are within acceptable limits for stress and deformation values. The factor of safety for the body is about 3, which was sufficient for this type of component.

Jaws

Both jaws are going to be exposed to a variety high loads during different stages of the gripping process. High forces are required to grip and hold the rebars, this results in high loads on both jaws. During the translation of rebars, friction forces will result in a sideways moment on the jaws, these friction forces are mostly due to the grooved surface of the rebars. To ensure that the jaws will handle these types of loads without permanent damage or deformation to the jaws and tool body alike, a FEA was utilised. The analyse was set up using the loads and forces that were gathered during the product development phase, chapter 4.4.1 components.

An aluminium alloy, 6061, was chosen, which is a common material that was considered to be appropriate for this application. It is the same aluminium alloy used in the internal tool body.

The tests were simplified so that the only active force is from the pneumatic cylinder and the rebar in this case, acts as a fixture. As mentioned earlier, green arrows visualise fixtures, so the front of the jaw is fixed, and a fixed hinge is placed in the hole, acting as an axis. Purple arrows in the top right of the jaw, visualises the force from the cylinder.

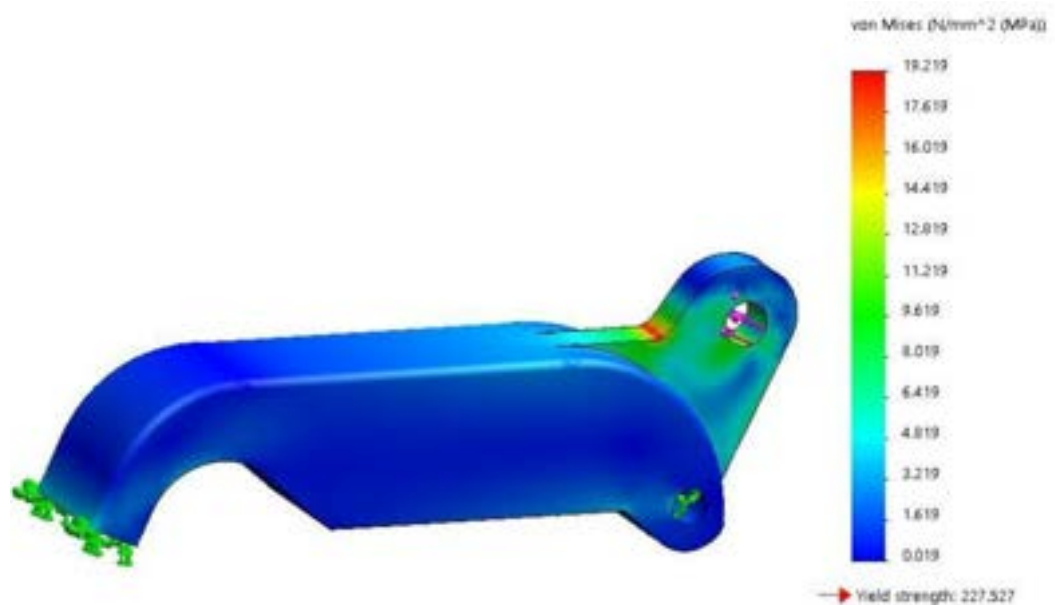


Figure 24 – Stress result of jaws

Results from the analysis shows that the top jaw does not have any risk of being permanently damaged by the loads caused by the pneumatic cylinder. With a yield strength of 227,5 MPa there is no risk that the maximum stress of close to 20 MPa, can cause any permanent damage to the component.

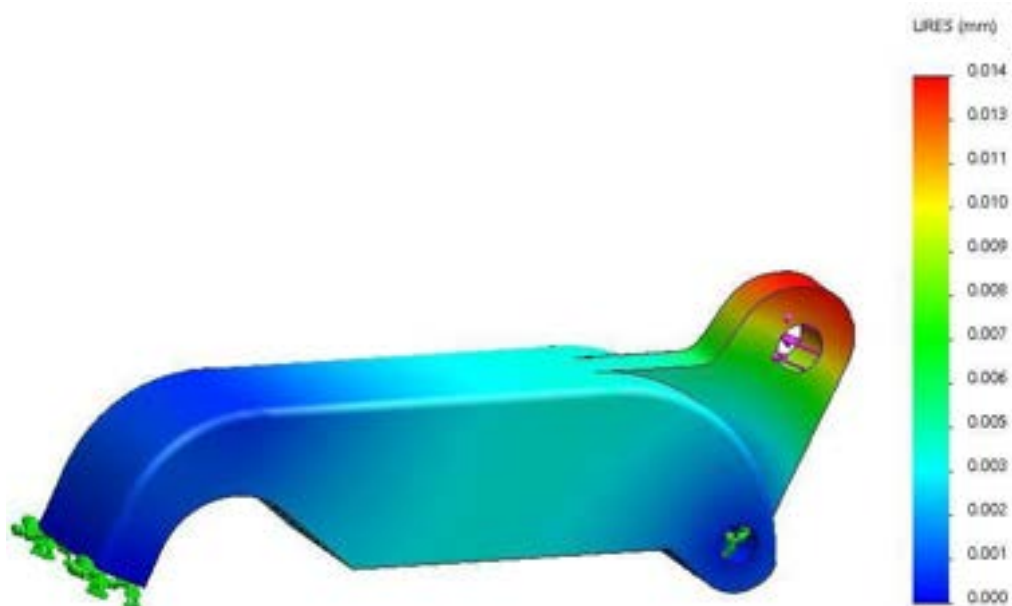


Figure 25 – Deformation result of jaws

When analysing the deformation, the maximum deformation found is only 0,015 mm. This deformation can be found around the application point of the forces from the cylinder. Both the deformation values and the values of stress are within reasonable limits for such an application.

With a maximum stress of 20 MPa, a factor of safety of almost 12 can be established. The bottom jaw is similar in design to the top jaw, the only difference is the wider wire canal and the more rigid back. By looking at both designs it was determined that no simulation would be needed.

4.4.4 Revised Concept

The final concept design was revised to help enhance the quality of the product by using the results that were acquired from the DFX and FMEA tools that were used during the evaluation phase.

The complex tool body made the current wire path difficult to adapt to the body design and the FMEA revealed the risk of high wear on the wire canals. Because of this, the tool was re-designed with a flexible wire canal similar to the wire canals used by welding robots. This allows the canal to adapt to the current speed of the wire and adjusts to the wires desired bending. This solves several of the risks that were identified in the FMEA.

The FMEA also revealed that the gripper part of the jaw may be exposed to high wear due to the friction that the grooved surface from the rebars will cause. To minimise this wear and prevent the jaws from breaking, smother edges were added. Both jaws were also redesigned with new separate grip surfaces to increase durability to wear from the rebars as well as improve the maintainability of the jaws.

The result of the FEA indicated that the dimensions of the jaws could be reduced, during the revised concept they were therefore redesigned by reducing the solid material of the component. Changes resulted in a weight reduction of the upper jaw of 130 g but the factor of safety was only reduced to 1.1. When evaluating these results, it was decided to keep the original design with solid jaws. Extra machining time and costs, and minimal differences in weight and durability were the reasons for this decision.

When evaluating maintainability of the final concept, some areas of improvement were revealed and adjusted to enhance the maintainability of the product. Before the tool can be used, wire must be manually fed into the machine. This was considered difficult to do alone with the current feeder design. A spring-loaded locking mechanism was added to lock the spring-loaded lever holding the driven feeder gear in place. This allows the worker to utilise both hands when inserting new tying wire into the machine.

The wire blocks attached to the wire head that grips both ends of the tying wire were considered complex to replace, if needed, during maintenance. They were redesigned to be interchangeable without a need to remove the external tool body. The blocks' grip surfaces were also redesigned to increase the coefficient of friction. The grip now has a polyurethane surface, the material has a hard-wearing surface and is resistant against rough weather conditions, temperature changes and oil (Kuntze, 2017). Steel against steel has a coefficient of friction of 0,18, by adding Polyurethane to the grip surface the coefficient of friction will increase to at least 0,6 depending on chosen hardness (Sunray-inc, 2016).

4.5 Product Support

To be able to further develop the final concept into a fully functional product, supportive documents are needed. These documents include drawings, component lists, and component specifications. Product support documents will be presented in this chapter.

4.5.1 Mock-up

In order to demonstrate and evaluate the design of the tool a mock-up was manufactured. The mock-up was manufactured using 3D-printed components that were printed at the prototype lab at Mälardalen University in Eskilstuna.

All components were made in the 3D-CAD software SolidWorks, and then prepared for 3D-printing by using custom software for the individual printer. Several different types of printers were used depending on the desired quality of each component. Objet

eden260v uses thermosetting polymers, called photopolymers, and gives high quality prints. For lower quality components Ultimaker 2 and a Makerbot Replicator z18 was used, these two printers both use PLA plastic. After each print some components required extra manual work such as paint jobs, threading and polishing. Due to the load from the components and the design, the internal body was milled using a CNC mill in a wood like chemical material.

The mock-up will be delivered to Robotdalen and Skanska for evaluation and used throughout the rest of their project.



Figure 26 – Manufactured parts for the mock-up

4.5.2 Material for Manufacturing and Realisation

The final concept uses components from different manufacturers. Information about these components, such as data sheets and information about each component is presented in appendix J. The appendix will also include a list of all components used in concept with name, article number and quantity.

The concept also consists of custom parts, these parts with concept drawings, assembly drawings and exploded view of the concept is presented in appendix J. The purpose of these drawings is to give the reader a way to understand and assess the size and proportions of the tool and the specific components. Parts created during realisation of the concept in SolidWorks together with FEA will be handed over to Skanska and Robotdalen as these are most important data for further realisation.

4.5.3 Patent

Since the early stages in the Skanska project, *Awapatent* has been involved to protect the idea from being used by competitors and to guarantee that there were no patents on similar ideas.

The custom robotic grip and tying tool that has been developed during this thesis work is in many ways unique. Research about patent carried out during the pre-study indicated that there are no similar tools or patents protecting such an idea today. This made *Awapatent* start a process to evaluate the possibilities to apply for a patent for this solution. Product support was carried out to ensure a qualitative and well-documented result that will aid Awa in their process of evaluating the possibilities of a patent application. During the course of this project, all information has been kept confidential from outsiders to protect this idea. This report will be kept confidential until *Awapatent* has evaluated the claims of this product, and idea, being unique.

5 Result

This chapter presents the result of the thesis work. The chapter presents the different areas of the tool in its entirety and at a component level.

The aim of this thesis work was to develop a concept for a *custom grip and tying tool* and to manufacture a mock-up that shows size as well as proves the basic functions of the tool. The result consists of two parts, a concept of the custom tool and the manufactured mock-up.



Figure 27 - Concept of custom robotic grip and tying tool

5.1.1 Tool

The tool is designed to be the most efficient application for the ARCAS. It has been developed to be space efficient, lightweight, and usable with high precision. It is designed to handle two main functions, to grip and hold rebars during transfer, and to tie several rebars together using 1,5 mm steel tying wire. The shape and size of the tool have been optimised with focus on being able to access all tying nodes and the ability to deliver all rebars to their assigned location.

By combining some components responsible for these two functions, the tool is designed with higher efficiency. The number of components are reduced, its external dimensions are kept to a minimum and ultimately, it will contribute to a more efficient automated rebar cage assembly process. Simulations carried out by Robotdalen allowed estimations that a combined tool can reduce the assembly time per rebar cage by up to 40 minutes.

Grip function

The tool is designed with two jaws that grip and hold rebars with a diameter up to 32 mm. They are designed in such a way that rebars will be gripped at the end of the jaws, which are located at the front end of the tool. This gives the tool maximal accessibility in the rebar cages without risk of colliding with rebars within the cage during the process of transporting and dropping off rebars.

The jaws are issued with separate grip surfaces, these have a grip diameter larger than the diameter of the rebars, this in turn allows free rotation and linear translation of rebars. They are designed for easy maintenance and to withstand wear from moving rebars. The grip surfaces will be manufactured in a wear-resistant material, such as a Hardox steel from SSAB. These grip surfaces combined with jaws that will be

manufactured in 6061-T4 aluminium provides a strong and durable solution for holding the rebars while transferring them during the process.



Figure 28 - Tool holding a rebar

Both jaws are controlled using pneumatic cylinders that are connected to each jaw using rod clevises. The air required by the cylinders are supplied by the robot with the help of tubing located inside the tool. Pneumatic tubes run from the tool attachment and connects to each cylinder with the help of pneumatic fittings. The system of tubes is mounted inside the tool body using tube clips as a precaution to prevent them from moving around inside the tool. All pneumatic components are standard components from Festo. Holes for air tubing are located at the back of the tool body, they are sealed using rubber seals to prevent moisture and dust from getting in the tool and to prevent wear on the tubes.

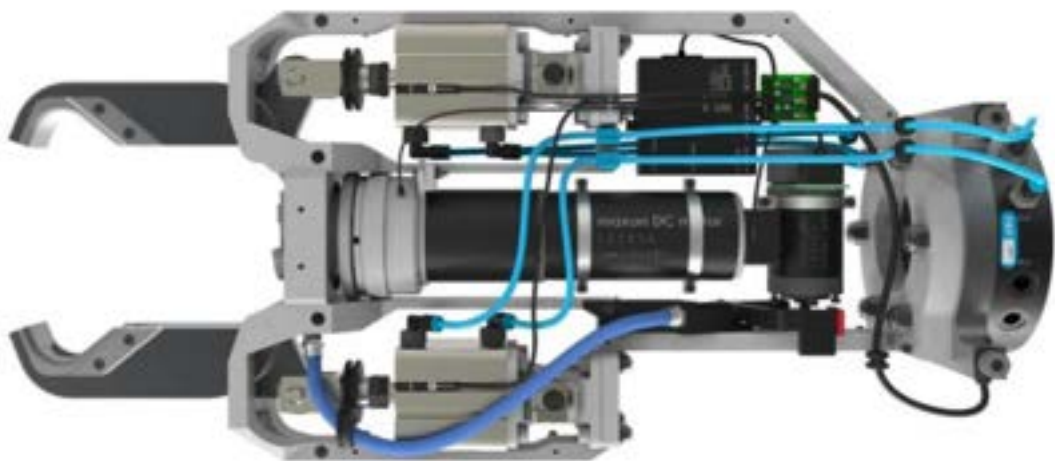


Figure 29 - Internal body and components

Tying function

The tying system is a custom designed system tying straight knots. Straight knots have a low chance of getting stuck in the tying head and rebar guards after the tying process is completed. Tests shows that straight knots can bear loads of 1019 N, which is comparable with commercially used rebar tiers, but with much less used wire.

Depending on rebar tier model, the use of wire varies between 210 and 1400 mm. The result of this thesis uses approximately 230 mm, putting it in the lower range of wire usage. This is a reduction of wire usage by up to 84%, and in turn this could remove almost 3000 kg of weight from the rebar cage, given that the ties have the same performance.



Figure 30 - Close up of wire head and wire

By using innovative design and smart components, the tying system carries out multiple working sequences using only one motor when tying, and one motor operating the feeding process. An electrical clutch is the specific component that makes this possible.



Figure 31 – Illustration of tying process divided in three steps

The tying process can be broken down into several steps. When wire first is fed around the rebar, the front end is locked in place so that the wire can be reversed, resulting in it tightening around the rebars. When the system feels that the wire is tight enough, the tying motor reverses, resulting in both wire ends being locked in place. Now, the electrical clutch will lock the internal and external wire head together, allowing for two tasks being accomplished at the same time, tying the knot and cutting the wire. The

wire is cut during the tying process by utilising the torque from the tier motor, it is led through an opening where a sharp hardened steel blade is placed. When the tying motor rotates the external wirehead, the wire is simultaneously cut.



Figure 32 – Close up of a straight knot

The combination of components that make up the tying system is first of all the motor and planetary gearbox from Maxon motors and an electrical clutch from Ogura. These components decide which component that rotates, and when. The rotating components are the internal and external wire head. On the face of the internal wirehead two wire blocks are mounted that are responsible for gripping the different wire ends. The external wire head together with the cutter is responsible for the making of the knot itself as well as cutting the wire. All custom components in this system are designed in steel to guarantee a durable construction with minimal need for maintenance.



Figure 33 – Exploded view of tying system

Two rebar guards are located at the front of the tool to provide support for the rebars and to protect the wire head during tying. These guards are designed to be durable and easy to replace. They are mounted to the internal body using two M3 screws.

Depending on rebar combination, the variation in rebar placement may vary. As seen in picture 32, the dimensions of the tying area are around 115 x 100 mm. This means that the placement of a 32 mm diameter rebar can vary ± 34 mm in Y-dimension and $\pm 41,5$ mm in X-dimension.

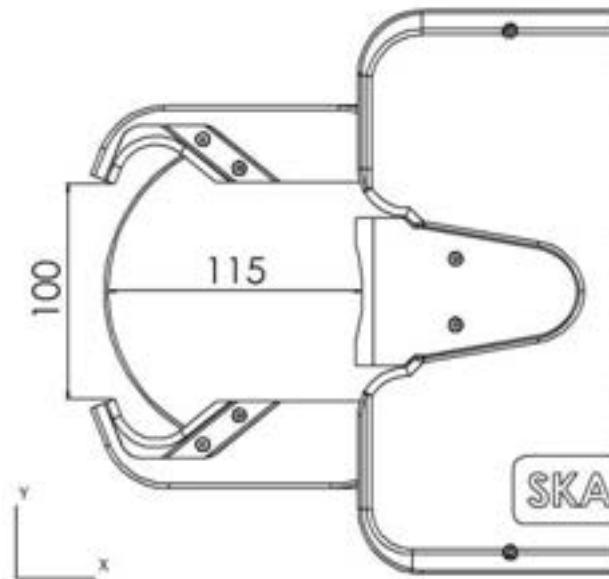


Figure 34 – Close up of tying area

All wire is fed to the tool using an external feeding system, similar to the ones used in welding robots. When the wire has entered the tool, a combination of feeder gears, a motor and a gearbox is used to control the internal feed rate of the wire. It is fed into a custom designed internal wire canal. This wire canal is flexible, meaning that it adapts to the behaviour of the wire. It is similar to the external system, but only smaller and more adapted to the inside of the tool. High feeder efficiency is acquired using a spring-loaded feeder gear that applies pressure to the wire, thus increasing friction. The spring-loaded lever is designed to make loading of new wire easier. This is made possible with the help of a feature that allows it to be locked in place during maintenance.



Figure 35 – Close up of feeder system and adjacent components

Body

The tool body consists of two sub groups of components, one internal, and one external tool body. The internal body serves as a framework which holds the components in place and carries most of the forces and loads acting upon the system.

Two halves make up the internal tool body, which is designed in an aluminium alloy called 6061-T4. During the assembly process, both halves will be screwed together holding the front rubber seal and ball bearing in place. This is the ball bearing that bears the external wire head and reduces its rotational friction. Two axes, carrying the jaws are also secured in between both halves of the internal tool body. Bronze bushings sit in between the jaw axes and the body halves. These make them run smoothly and prevents unwanted noise and wear. Both cylinder mounts are screwed to both of the halves, securing them even more.



Figure 36 – Exploded view of body components

An external plastic body protects all internal components, it is designed around the internal body to avoid unnecessary usage of space. It consists of four plastic parts which will be injection moulded in a rigid plastic material. In case of wire jam or when reloading new wire, the left back part can easily be removed to access the feeder mechanism.

The parts will be screwed to the internal body using M3 screws. In between all external body parts there are rubber seals with the purpose to help shield the internal components from water and dust. The colours of the tool are chosen to follow the design of the modern ABB IRB robots, a neutral colour radiates a feel of security. The neutral grey colour of the tool combined with the blue colour of the Skanska logo gives an impression of a quality design that will give the construction industry a more modern touch.

Miscellaneous

Information is gathered from the system using sensors and encoders. Both electrical motors are issued with encoders that gathers data about speed and position, both pneumatic cylinders have proximity sensors that shows the current position of the

piston rod, all this information is then sent to the controller who sends feedback to an external robot controller. Information about required torque for tying a specific knot can later be used to evaluate the success rate of the process.

The link between the robot and the tool is a tool attachment that allows compressed air and electric signals to be transferred from the robot to the tool. It is a model TA100-8 that is manufactured by *rsp*.

The tool with all the chosen components has a total weight of approximately 11,5 kg. The maximum dimensions of the tool are 547 x 168 x 257 mm, the area around the tying and grip function has a width and height of only 30 x 174 mm.

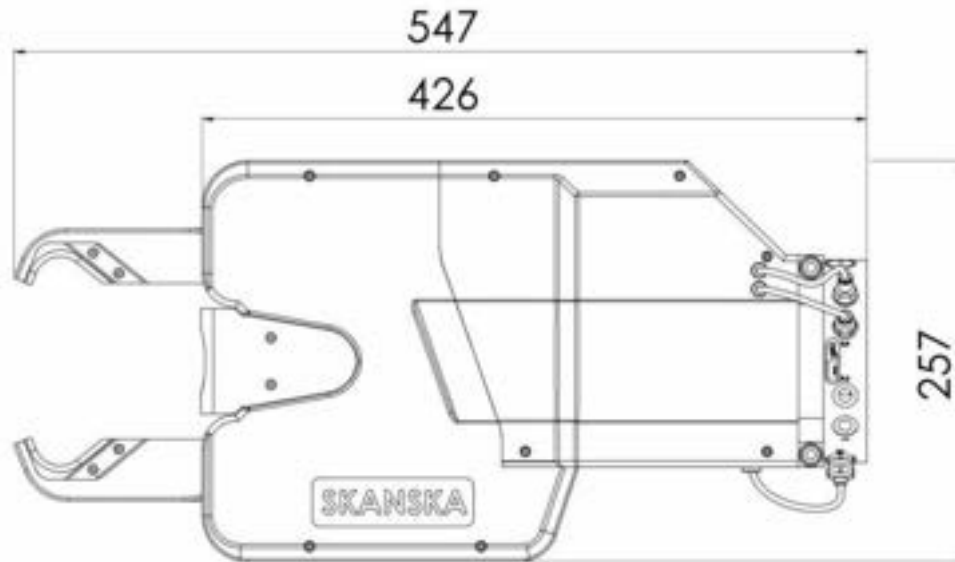


Figure 37 – 2D drawing of external tool dimensions

5.1.2 Mock-up

The aim with the mock-up was to be able to physically demonstrate the size of the tool and the integrated components as well as show the basic functions of the tool. It was manufactured, processed, and assembled at Mälardalen University. All components are 3D-printed apart from the internal body that was manufactured from a wood-like chemical material using a CNC mill. Larger 3D-printed components are processed then glued and mounted to the internal body.

The mock-up has movable jaws and pneumatic cylinders which allow physical visualisation of the grip function. Tying function, with the movable components which will tie the knot, can also be tested in the mock-up. Additionally, the external body is assembled in such a way that it is possible to test how the maintenance will be carried out as well as the feed-in wire in the tool will be operated.

6 Analysis

This chapter presents the analysis conducted by the authors to answer the problem formulation and the research questions from chapter 1.1 and 1.4. There is also an analysis of how well the technical requirements, presented in chapter 4.2.7, were met.

6.1 Analysis of Problem Formulation

The tool allows automation of a rebar cage assembly thanks to carrying out several desired tasks. It helps carry the rebar from the fixture to the desired location, and then ties the rebar in place. The problem formulation states that there is a need of a custom designed robotic tool that can handle several tasks and working sequences. This thesis provides a concept of a robotic tool that can carry out all the desired tasks in the assembly process.

Without a prototype it is hard to claim perfect physical behaviour of the tool during certain parts of the process. This can involve, such vibrations that occur during rebar transfer of rebars or during acceleration.

6.2 Analysis of Research Questions

In this chapter the two stated research questions are analysed to see how well they were answered during the course of the thesis.

§ RQ1: What is required of a robotic tool to tie cylindrical objects using an industrial robot in an automated process?

The authors conducted an extensive pre-study to find the answer to this research question. This includes studying the ARCAS process, analyse of various tools on the market and interviews with people who have knowledge about rebar tiers and rebar tying. This pre-study shows that there is a variation in rebar dimensions as well as precision and quality of the rebars. This means that the tool must wind wire in a greater loop than the combined radius of the rebars to make sure that the knot includes all rebars that are to be tied. This solution uses the large loop to deal with dislocated rebars instead of moving the tool to zero in on the dislocated rebars which was desired when the process was designed in Robotstudio.

When studying the process, and during discussions with supervisors at Robotdalen, it was established that larger rebar cage designs will result in high loads on the knots. This was solved by analysing and evaluating different knot designs as well as behaviour of knots during loads. These studies resulted in the need of a rigid and strong knot that can stay tight even at high loads.

To conclude, the tool is required to successfully wind wire around different size and quality rebars and tie a knot that can guarantee a strong and rigid construction.

§ RQ2: How should a robotic tool be designed to safely handle cylindrical objects as well as tie high strength knots in an automated process?

This thesis resulted in a tool that have been designed throughout the course of this thesis. Studies and calculations have been carried out to enable high performing functions. To ensure a safe handling of cylindrical objects, in this case rebars, calculations of loads and forces have been made to find components that would make this possible. Pneumatic cylinders and jaws have been chosen and designed with high performance and maintainability.

An extensive study of automated rebar tiers and knots was carried out at the early stages of the project to find the most optimal knot and tying design. A straight knot design was proven to be superior on a number of points. It does not unwind at low loads since it only wound once around the rebar, it uses only a fraction of the amount of wire required to make multiple wound knots and its durability is determined by the

thickness and material of the wire. A wire thickness of 1,5 mm makes the knot strong enough to withstand the loads that were specified in the technical specifications. A custom designed tying mechanism was developed to tie straight knots with high efficiency. This design was a result of a development process with constant evaluations and design improvements.

6.3 Analysis of Technical Specifications

Analysis will only be carried out on the key specifications presented in chapter 4.2.7, the remaining specifications can be found in appendix G.

- A grip diameter of 32 mm is required to fully grip all kinds of rebars.
- Provide a grip force that can lift and hold the largest rebar with a weight of 20 kg.
- The size of the tool cannot exceed 600 x 80 x 150 mm.
- The tool must have a tie width minimum of 100 mm.
- The tool must have a grip width of minimum 52 mm.
- The weight of the tool must be less than 20 kg.

The result has jaws that enables grip of rebars up to a diameter of 32 mm, and also have the possibility to run freely within the grip. Selection of cylinder models was done with the help from the data that was acquired from the calculations that were done to calculate the required force, this means that the grip force is sufficient to grip and hold rebars.

The result has maximum dimensions of 547 x 168 x 257 mm. In the technical specifications, it was stated that the tool cannot have a width greater than 80 mm, this dimension is only relevant at the front of the tool which will be close to other rebars during the process. The maximum dimension of 168 mm is found at the back of the tool as a result of the dimensions of the adapter plate and the tool attachment. When measuring the front half of the tool, the maximum width is 86 mm.

The specification of tool size was based on simulations that had been made in an earlier stage of the Skanska project. A deviation of 6 mm of the tool body was accepted at this stage, and it will not be considered a problem since an early simulation is everything that was used as a base for the size specifications. The distance between the jaws are 100 mm and the tying wire reaches 115 mm from the rebar guards, this clearly states that the tool has a tying width minimum of 100 mm as well have a grip width of 100 mm. All components combined gives the tool a total weight of 11.5 kg which is lower than the stated maximum weight of 20 kg.

- Tie quality must be consistent to provide safe usage of tool.
- The strength of the tie must be greater than 1000 N to assure a sturdy assembly.

The tying function is designed to be consistent and tie high quality knots that are not affected by various rebar sizes, environmental aspects or tying angle. Practical laboratory tests show that the kind of knot used for this tool, a straight knot with 1,5 mm wire, has a limit of failure mean value of 1019 N. New tests using a prototype has to be conducted to prove that the tying function of this tool can assure the same quality. The straight knots that were tested were done manually by hand and cannot be considered equal to machine made straight knots.

- Number of components must be as low as possible to minimise cost, weight and size.
- Number of different components must be as low as possible to increase manufacturability and maintainability.
- The tool must be able to withstand water and dust from a demanding working environment.

- The complexity of the tool design must be as low as possible to lower manufacturing cost and enable high maintainability.
- By demanding low number of working sequences the lead time can be minimised.
- One of the main reasons for the tool is to eliminate the human factor, thus no human interactions are allowed.
- The tool must be able to withstand the demanding working environment.
- The tool must not be negatively affected by temperatures between –20 to 40 degrees Celsius.

Number of components and component variation has been kept to a minimum during development of the concept. DFX tools have also been used to further reduce the number of components in the design. There are a number of custom parts, but that number has been kept to a minimum to avoid high manufacturing costs. The tool is designed to seal all internal components to protect them from dust and water. If the tool can perform whilst being exposed to the set parameters of the IP44 classification has to be evaluated with more extensive testing and by making a physical prototype. No components used in the result have problems working in temperatures ranging between -20 to 40 degrees Celsius.

When the tool is working during the process, there is no need for any human interaction with the tool. The only times a worker need to interact with the tool is during maintenance, cleaning and when new tying wire must be loaded.

All the key specifications have been evaluated and tackled during the course of this project, and all of them have been solved to a certain extent. Some specifications are hard to prove as a success without further and more extensive testing. So, when looking at the technical specifications, the project can be considered successful.

6.4 Analysis of Customer Guidelines

In the early stages of the thesis work there were some things that would be desired from the result. These were guidelines given by the team at Robotdalen and Skanska and were not in any way demands, but only guidelines that were used to develop a qualitative and successful result.

- Focus on finding a solution using regular 1,5 mm steel wire.
- Focus on finding solutions based on reliable and proven methods.

The tool is using regular 1,5 mm steel wire to tie knots. These guidelines were be able to make more rigid and higher quality knots for the new and larger rebar cage designs. It was also proven during the practical laboratory testing that 1,5 mm wire was superior to 0,8 mm. In the result, it is stated that the tool is designed to tie using 1,5 mm wire.

The guideline that stated that the tool should only use solutions based on reliable and proven methods were based on the fact that the ARCAS concept is going to be realised in the years to come, meaning that too many new and never before tested methods can delay the process and increase the risk of it failing. This resulted in many basic functions that solves the problems.

- It is desired to tie and handle rebars with a diameter up to 32 mm.
- It is desired that the tool can fixate the rebar while making a knot.

The rebar cage that the proof of concept is based on will only include rebars up to 25 mm, which today is the maximum size of coiled rebars in Sweden. However, more and more countries are using coiled rebars up to 32 mm, therefore, Skanska desired that the tool could handle rebars up to 32 mm, which is the case of the concept result.

To guarantee high quality rebar cages it was desired to be able to fixate the rebar in the tying spot during the tying process. This was considered very complex with the

current rebar cage designs, and it would increase the complexity of the tool. This was instead solved by winding a large wire loop around the rebars and then tighten it before finishing with a knot.

7 Discussion, Conclusions & Recommendations

This chapter presents the Discussion and conclusions of the project. Both regarding the thesis work and the project with Skanska and Robotdalen in its whole. The chapter will also present recommendations from the authors regarding further development of the tool and the next step in the project.

7.1 Discussion

The thesis work has been very rewarding for both authors in terms of responsibility, in both project planning and execution, product development as well as working together with big companies in large scale projects. Such level of responsibility is very rewarding, especially as a student. Students rarely have the chance to partake in discussions and important decision making among companies, especially when this is more than a small development project. Skanska has invested time and money and are hoping to realise this concept and implement it at a construction site in the years to come.

The project was scheduled for 40 hours per week over a 20 week period. At the first half of the project, when information had to be gathered and meetings and interviews had to be planned, the hours per week varied. This was mostly due to waiting time for meetings, interviews and project briefings. This was adjusted in the later stages of the project where more than 40 hours per week was spent on the project. This resulted in a time plan that was not followed to 100 % and changes had to be made due to some phases taking more time than first thought and some phases not requiring the time that was distributed. This concludes in the importance of a well-established time schedule that leaves room for smaller changes and adjustments.

7.2 Conclusion

When the project began, it was clear that the construction industry was in need of a more extensive use of automated processes. The ARCAS would reduce sick leave, increase efficiency, and reduce long time costs. This thesis focus on only a small part in the large-scale project that is the ARCAS and its software. When analysing the process, and having discussions with Robotdalen and Skanska, the need of the tying tool was made clear. One of the goals of having an automated process is to reach maximum efficiency, and to be able to accomplish such a thing all kinds of stops have got to be eliminated from the process. With the help of this tool, the process is able to eliminate the need of changing tool between tying and carrying rebars.

Securing rebars to each other by tying may be considered an outdated method, but due to restrictions in bridge construction it is still the best allowed method of today. Construction workers with experience of manual rebar tying consider welding a valid method of securing rebars. Welding changes the material properties of the rebar and as a result of this, welding of rebar cages is restricted in Sweden. Changing or removing these restrictions is a process that will take many years, if even possible. On these grounds, the authors see good potential in the use of this tool in rebar cage manufacturing for many more years.

The purpose of this thesis was to evaluate the possibilities to develop a custom robotic grip and tying tool that could grip and tie rebars in an automatic rebar cage assembly station. The concept of the robotic tool and the process presented in the result chapter satisfies this purpose. The thesis aims have been reached and proven it possible to combine functions that makes it possible to grip and tie rebars in an automated process. Information that can be used for future work has been gathered and presented in the report as appendices, studies and recommendations.

The result of this thesis is only a concept, so there is room for further development. Some of the areas that could be developed are presented in recommendations. Areas

that should be studied to guarantee quality results and to ease future work with the ARCAS process are also presented in recommendations.

7.3 Recommendations

During the course of this project a number of questions, thoughts and ideas have emerged. This can be ideas that are too far from the authors field of knowledge or simply too large to be analysed and considered in this thesis work. Several risks that were found when analysing the concept with the help of a FMEA requires a prototype combined with further analysis of rebars.

To ensure a fully operational and safe rebar tying tool for large scale rebar cage constructions, safe and rigid knots are of most importance. As of today, there is a lack of information regarding the requirements of knots that are used in rebar constructions, and with the new method of using an ARCAS, larger rebar cages will be built. These new cages will be even larger resulting in higher loads and tensions on the knots. As a result of this, a large study will have to be carried out to find the loads on ties within a rebar construction. When solid requirements and values have been compiled, testing and evaluation of the current knot design and strength can take place. This is to ensure the safety of construction workers and construction sites alike. The decision of the knot design was based on durability and size of the knot, which was taken from the technical specifications. Even though the current knot design meets the specifications, there is still room for improvement. The knot would be more optimal for its purpose if the height could be reduced to a minimum to remove risk of collisions. Large knot heights can also cause rust in the construction, even after concrete has been applied, as was stated by Erkki during the interviews.

Evaluation of external wire storage as well as the system that feeds the wire has to be carried out to see if a system similar to the ones used by welding robots can work for this system as well.

Is has not been investigated how much the dislocation of the rebars will be in this type of construction. But it can be stated that this may be a problem since rebar benders cannot produce rebars with the precision that the simulations of the ARCAS demands. During the early stages of the project was it therefore desired that the tool would be able to zero in on a dislocated rebar to its desired fix point. This was considered too complex because of the requires of the technical specification that resulted in a need of prioritising the most important specifications. The current design of rebar cages is not in any way adapted for this kind of solution without it being overly complicated. So, the decision was made that the tool was designed with larger jaws which would be able to handle rebars that are slightly dislocated.

This resulted in the conclusion that an investigation will have to be carried out to investigate how large of dislocation of the rebars will be, and if necessary, develop new solutions based on the result of this thesis work.

Rebar cage design has to be altered to ease the ability for a robot to tie rebars together. Modern day cages are not designed with this purpose in mind and a lot of design choices are made by the construction workers during the process of assembling the cage. A construction worker also got the ability to manually adjust both the rebars and the tying tool to his or hers liking depending on tying node. This makes the process of tying rebars much easier for a construction worker than a robot. Such changes got to be kept in mind during the development process of rebar cages that are to be used in the ARCAS. A set of rules and guidelines will be needed for the engineers responsible for the design or future rebar cages that will be constructed in this automated process. An investigation to find these guidelines has to be carried out to ensure high efficiency in the assembly process as well as high quality cages.

At an early stage of the project there was knowledge of dirt being a major problem to hand held tying machines, and that it would be a problem to the robotic tool. Before it was decided upon a IP-classification the idea of a self-cleaning pneumatic system was discussed. By using internal pneumatic tubing dust and water could be removed with the help of compressed air. This concept was scraped when an IP-code was proven to be sufficient. But for external parts, such as the wire head and both jaws, especially the wire canals in the jaws, this could still be a valid option to reduce maintenance time and improve performance. This is also a valid option in case the desired IP-code would be too hard to fulfill.

Both jaws were issued with separate and replaceable grip surfaces that would be manufactured in a more durable material than the jaws. The same could be done with the wire canals in the jaws since the wire will wear on the current wire canals. This could result in that both weight and manufacturing time could be saved.

Without physical test is it hard to estimate the wear that the grip surfaces will be exposed to due to the grooved surface of the rebars. When generating concepts different methods to grip movable objects emerged during the brainstorming session. The majority of these methods were considered to be too complex due to limited dimensions of the tool. If the tests show that the rebars are too negatively affected, more studies of the behavior of a rebar moving on the grip surfaces could be carried out to see if further development has to be done to reduce effects on the tool of a moving rebar.

All the electrical components that have been chosen for this concept might not be the most optimal for their purpose, they can be too expensive or simply not effective enough in combination with the rest of the system. This has been limited by the lack of knowledge in the field of electrical components and drivers as well as the time limit of the project. None of the components have been chosen with regard to a certain manufacturer or brand, but all motors with controllers and encoders are from the same manufacturer. Forces needed to twist and feed a wire has only been estimated which made the choice of feeding and tying motors complicated. Further studies and testing must be done to prove that the motors that are in the result works as intended.

8 References

- ABB. (2016). Retrieved 09 06, 2016, from Robotics:
<http://new.abb.com/products/robotics>
- ABB. (2016). Retrieved 09 06, 2016, from IRB 4600 – en generation med precision:
<http://www.abb.com/product/seitp327/b5d06dfb04041533c125751c004383a6.aspx>
- ABB. (2016). Retrieved 01 03, 2017, from Så funkar det, Industrirobotar:
<http://new.abb.com/se/om-abb/teknik/sa-funkar-det/industrirobotar>
- Ahmadzadeh, F. (2015). *Research Methodology*. Eskilstuna, Sweden.
- ati-ia. (2016). Retrieved 12 10, 2016, from robot tool changer: http://www.ati-ia.com/products/toolchanger/robot_tool_changer.aspx
- Atlas Copco. (2016). Retrieved 10 12, 2016, from new concrete equipment from atlas copco complements previous machines and simplifies the work:
<http://www.atlascopco.se/sesv/news/productnews/new-concrete-equipment-from-atlas-copco-complements-previous-machines-and-simplifies-the-work.aspx>
- BEGROUP. (2012). *Handbok armering i grunden*. Malmö, Sweden. Retrieved 09 21, 2016
- Bjorklund, M., & Paulsson, U. (2014). *Academic papers & Theses: To Write & Present & To Act as an Opponent*. Lund, Sweden: Studentlitteratur AB.
- Bnproducts. (2016). Retrieved 09 20, 2016, from BNT-64 Product Manual:
http://www.bnproducts.com/assets/pdf/BNT-64_Product_Manual.pdf
- Bonde-Wiburg. (2000). *Karlebo Handbok*. Stockholm: Liber.
- byggkatalogen. (2014). Retrieved 09 21, 2016, from Byggfakta armering:
<http://byggkatalogen.bygggtjanst.se/byggfakta/armering/1>
- Cardaci, K. (1992). *CAID: A Tool for the Flexible Organization*. Design Management Institute.
- Clarke, A. E. (2005). *Situational Analysis, Grounded Theory After the Postmodern Turn*. London: Sage Publications, Inc.
- concrete-mesh. (2016). Retrieved 01 03, 2017, from Reinforcing bar:
<http://www.concrete-mesh.com/concretemesh/reinforcing-bar.html>
- Epigeum Ltd. (2009). *mybu.bournemouth.ac*. Retrieved 09 10, 2016, from Research methods in the social sciences:
https://mybu.bournemouth.ac.uk/bbcswebdav/orgs/Com_BRAD_0713/RScourses/research_social_sciences/html/course_files/deductive_4_2.html
- Hellström, E., Hedelind, M., & Ernlund, J. (2009). *Industrial Robotics Compendium*. Unpublished.
- Hudock, J. T. (2007). *Biomechanical Assessment of Three Rebar Tying*. Taylor & Francis.

- Kuntze. (2017). Retrieved 01 03, 2017, from Polyuretan 90 shore 205:
<http://www.kuntze.se/produkter/gummiduk-gummipackningar-cellgummi-cellplast/polyuretan-90-shore-205>
- Lövgren, R. (2009). *DFA –Design For Assembly*. Eskilstuna.
- Manzano, A. (2016). *The craft of interviewing in realist evaluation*. The University of Leeds.
- Markeset, T., & Kumar, U. (2001). *R&M and Risk-Analysis Tools in Product Design, to reduce Life-cycle Cost and Improve Attractiveness*. Stavanger University College.
- maxusacorp. (2016). Retrieved 09 19, 2016, from product detail RB90512:
http://www.maxusacorp.com/product_detail.html?productcode=RB90512
- New.abb. (2016). Retrieved 10 01, 2016, from IRB4600:
<http://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/irb-4600>
- Rajasekar, S., Philominathan, P., & Chinnathambi, V. (2013). *Reserch methodology*. Physics.gen-ph.
- Robotdalen. (2016). Retrieved 09 16, 2016, from om robotdalen:
<http://www.robotdalen.se/sv/om-robotdalen-robotdalen-ar-en-satsning-pa-fler-nya-robotinnovationer>
- Rsp.eu. (2016). Retrieved 09 27, 2016, from Highlights:
<http://rsp.eu.com/highlights.php?id=200>
- Sandberg, J., & Hjort, B. (1998). *Rationell armering, ergonomi – ekonomi – miljö*. Halmstad, Sweden: Tryckmedia. Retrieved 09 07, 2016
- Sapa. (2009). *Handbok för konstruktörer*. Sapa profiler AB.
- Skanska. (2016). Retrieved 09 09, 2016, from om skanska:
<http://www.skanska.se/sv/Om-Skanska/>
- Solidworks. (2016). Retrieved 10 01, 2016, from finite element analysis:
<https://www.solidworks.com/sw/products/simulation/finite-element-analysis.htm>
- Spiksäkert. (2017). Retrieved 01 03, 2017, from Mer isolering och armering:
<https://spiksakert.wordpress.com/2010/05/30/mer-isolering-och-armering/>
- Sunray-inc. (2016). Retrieved 01 03, 2017, from understanding polyurethane coefficient of friction: <http://www.slideshare.net/SunrayInc/understanding-polyurethane-coefficient-of-friction>
- Tjep. (2016). Retrieved 09 20, 2016, from Product 115122:
<http://www.tjep.se/product/115122>
- Tytecker. (2016). Retrieved 09 18, 2016, from Products:
<http://www.tytecker.com/products.html>
- Ullman, D. G. (2010). *The Mechanical Design Process* (4 ed.). New York: McGraw.

Ulrich, K., & Eppinger, S. (2011). *Product Design and Development*. New York: McGraw-Hill/Irwin.

wackerdirect. (2016). Retrieved 09 20, 2016, from Wacker df 16 rebar tier: <https://www.wackerdirect.com/wacker-df-16-rebar-tier.html>

Österlin, K. (2010). *Design i fokus för produktutveckling: varför ser saker ut som de gör*. Liber.

Appendices

APPENDIX A.	Gantt Chart	I
APPENDIX B.	Situation Analysis	III
APPENDIX C.	Reverse Engineering.....	X
APPENDIX D.	Practical Laboratory Tests.....	XVI
APPENDIX E.	Interviews and Observations	XXVI
APPENDIX F.	QFD.	XXXIII
APPENDIX G.	Technical Requirements	XXXV
APPENDIX H.	Concepts.....	XXXVII
APPENDIX I.	FMEA	XLI
APPENDIX J.	Component Specifications and drawings	XLIII

APPENDIX A.

Gantt Chart

This appendix contains the gantt chart that shows the planned start and finish date of the thesis with it broken down into elements as well as the outcome.

APPENDIX B.

Situation Analysis

This is the result of the situation analysis of tying tools that are commercially available or currently being developed. It is an initial study that was conducted at an early stage to find fundamental information about rebar tiers. Several tools have been studied, analysed and compared. All of them are presented in this appendix.

Introduction

To get a deeper understanding about the basic functions of automatic rebar tiers it is important to study the variety of different tools that can be found on the market. This document is a study in the form of an analysis of modern automatic rebar tiers. It is being done as a part of the Problem Comprehension stage of the project to acquire essential information that can be used to find some of the requirements needed to develop a fully functional rebar tier for an industrial robot.

The Purpose & Aim

The purpose of this study is to gain a deeper understanding of the design of automatic rebar tiers.

The goal is to present a compilation of relevant information about rebar tiers as well as an evaluation of the different tools. This study will be used as a basis to find the requirements needed for a functioning product and when generating concepts in the product development process.

Problem Comprehension

When most of the information is gathered from different suppliers and manufacturers the result might be data that is biased. This is not considered a major issue due to the fact that the study is done to find the information about the function of the tool and not how it stands against its competitors when it comes to efficiency and price. When watching reviews of tools, it is taken into account that the information might be biased.

A factor that limits the possibility to buy and do product evaluations with physical tools is the high price of rebar tiers.

Method

The study will be done following the same research structure presented in the chapter Research Approach and Methodology found in the thesis Development project of a robotic tool for an automated rebar cage assembly.

Secondary sources will be the main source for information about the assortment of tying tools that can be found on the market. The information will be gathered from suppliers, technical specifications and in some cases technical reports, databases containing product patents and reviews.

Tools will be prioritised on their ability to be applied at a construction site where rebar cages are being manufactured.

Empirical data

When searching for information about the technical functions of the tools, there are a few factors that are going to be more useful when finding requirements for the development of the robotic tool.

- How does the product work from a technical aspect?
- Which type of tying method is used?
- Which sizes of rebars does the tool allow?
- Which size of steel wire does the tool use?
- Are there any obvious sources of failure?
- How durable is the tie?

Price and weight of the tools are also going to be taken into consideration. The reason for this is that it can show connections between cost or weight and a certain type of function.

The tools presented below are some of the most commercially available suppliers and models in the construction industry. Each model was selected to represent a specific type tool with a specific type of tying function. There are plenty of models with similar characteristics and functions.

Some of the tools presented below are being manufactured in different models and sizes. In this cases the model selection was done with the consideration to the intended usage of the information to the thesis work.

Wacker Neuson DF16 rebar tier

Wacker Neuson DF16 is a rebar tier that has no need for electricity. This is made possible with the help of a design that converts linear force to torque. A special type of magazine containing pre-cut wire is manually fed and wound around the rebar. Information presented by the manufacturer states that the time per knot is about 0.8 seconds and the tool makes 1000 knots per hour possible, including reload times (wackerdirect, 2016)



Figure 38 - Pictures of Wacker Neuson DF16 (wackerdirect, 2016)

TJEP RE-BAR XP 58

TJEP tying machine is one with the most traditional design that most of the machines on the market uses. The machine is a battery-powered tool that feeds the wire with high speed and with the help of guides around the rebars. The wire comes from a coil that is mounted on the tool and can wire up to 100 times on one magazine and will manage rebars up to 58 mm (Tjep, 2016).



Figure 39 - Tjep RE-BAR XP58 (Tjep, 2016)

BNT-64 Rebar Tier

The BNT-64 is an automatic rebar tier that runs on battery power. Using two jaw like grippers the tool grips the rebars and using the jaws as guides to feed the wire around the bars. It can tie 32x32mm rebar using 18 gauge (approx. 1.2mm) steel wire. The wire is stored on a spool and contains enough wire for 120-200 ties. According to the manufacturer it has a tying speed of 1.6 seconds per knot. The tool has a weight of 3.8kg with wire spool and battery, and out dimensions of 180 x 80 x 660 mm (Bnproducts, 2016).



Figure 40 - BNT-64 Rebar tier (Bnproducts, 2016)

Tytecker Rebar Pro

The TyTecker Rebar Pro is a tool developed to provide an ergonomic working condition for the construction worker. It is a heavy battery powered tool with a weight of 6.2kg and a battery charge that supports 2300-2500 ties. It uses steel wire that comes in the form of cartridges, or spools. It can tie up to 16mm rebars with a speed of 0.8 seconds per tie.

The method of tying is similar to other machines with a guide that guides the rebars. A major difference can be found in this machine compared to others, and that is that the Rebar Pro doesn't have jaws (Tytecker, 2016).



Figure 41 - Tytecker Rebar Pro (Tytecker, 2016)

Knut 39

This machine is one of the latest on the market, the tool can tie rebars between 16 – 39 mm with a speed of 1,5 per knot. According to Atlas Copco the battery will supply the tool with enough power to tie 2000 knots. It uses a 1.5mm steel wire and the tool has a weight of just under 4kg. The tying process results in a low profile knot (Atlas Copco, 2016).



Figure 42 - Knut 39 from Atlas Copco (Atlas Copco, 2016)

MAX RB517

The MAX RB517 is a lightweight rebar tying tool with a similar appearance as a majority of the tying tools currently on the market. The tool can handle rebars between 8 x 8 mm and 25 x 25 mm. The tool has a range of different tying options such as 3 or 4 wraps per tie. It uses standard 0.8 mm tying wire and allows 75 ties per coil with an option on 4 wraps per tie (maxusacorp, 2016).



Figure 43 - MAX RB517 (maxusacorp, 2016)

Evaluation

There is a wide variety of companies that manufacture rebar tiers today. Most of these are sold directly to construction companies and therefore the information that can be found on the internet is limited. Extensive research had to be made to find information about each machine as well as to take contact with people in the business to find specific machines.

An evaluation was made to find similarities in each design. All concrete factors are being presented. A majority of the data presented in table 6 and is specified by retailers or manufacturers of each model.

After studying and evaluating information about each tying machine and its tie, four factors that describes the tying function could be assessed. These factors are: consistency of each tie, durability of each tie, chance of failure in the tying process and the need of a second operation in the tying process.

Consistency of each tie describes the number of ties that stays true to a theoretically perfect tie. Irregular ties are regarded as an insecurity in the tying process, especially in an automated tying process. Tie durability is based on the tightness of ties as well as their absolute breaking point when under heavy loads such the process of moving the rebar cage after construction.

Factor of failure values the tools inability to complete a large number of tying processes without a failed tie. Failure in the tying process can be regarded as a minor insecurity when the tie is being made by a construction worker, but in an automated tying process it is crucial that each rebar is being tied successfully.

The need of a second operation in the tying process looks at the tie and values the need of a second operation such as flattening of tie or simply bending it to make space for another tie or a rebar.

Table 6 - Comparison rebar tiers

Factor	DF16	XP 55	BNT-64	Rebar Pro	Knut 39
Wire guide	Fixed guides	Fixed + flexible guides	Two flexible guides	-	Two fixed guides
Storage of wire	Strip	Spool	Spool	Coil	Spool
Type of wire	Clips	Continuous	Continuous	Clips	Continuous
Weight [kg]	2.2	2.4	3.8	6.2	4
Dimensions [LxWxH mm]	656 x 164 x 118	310 x 100 x 290	660 x 80 x 180	1050 x 260 x 200	-
Knots per wire load [no]	77	90 - 100	120 - 200	100	-
Tying cycle [sec]	Approx 0.8	0.9	1.6	0.8	1.5
Wire dimension [mm]	1.1	0.8	1.2	-	1.5
Rebar dimension [mm]	16 + 16	58	32 + 32	15 + 15	39
Factor of consistency [Low-High]	Medium	High	High	Medium	High
Durability of knot [Low-High]	Medium	High	High	Low	High
Factor of failure [Low-High]	Low	Low	Medium	Medium	Low
Need of second operation	Yes	Yes	Yes	No	No

The majority of the presented tools uses a continuous wire to tie the rebar. The wire is stored on a spool that is loaded to the machine. To guide the machine to place different types of jaws are used depending on application. By placing the jaws around the rebars and at high speed and with assistance the jaws, feed the wire around the rebars.

The weight of the tools is relative equal with the exception to the TyTecker, most likely the reason for this is the particular design with the long extension. Regarding the ties, the result of the performance of the tools differs more widely. For example, the BNT-64 and knut 39 requires more time per tie, this can be the result of a more complex tying process.

A problem in an automated tying process would be the need for a second operation after the tie has been made. This could be bending the tie to make room for another tie or a rebar. This is something that is an issue that is easily solved by a construction worker but much more complicated to solve with the use of a robot.

Wire storage in the form of a coil or a spool is proven to be much more effective than the use of pre-cut clips that are stored in a magazine, such as the one used by the Wacker Neuson DF16. Winding wire to a spool is most likely to requires less manufacturing processes as well.

When looking at the factors regarding the tie Knut proves to be the best tying tool. It has a high consistency and durability of ties, low factor of failure and has no need of a second operation due to its flat tie.

APPENDIX C.

Reverse Engineering

This appendix contains a reverse engineering study of a TJEP XP25 automatic rebar tier that was carried out to get detailed information about the design and functions of a modern rebar tier. It is divided into three steps, each focusing on different parts of the machine. The study is presented in text and with the help of pictures.

Introduction

The reverse engineering was done with the guidelines presented in The mechanical design process by David G. Ullman. The process is divided into three steps which starts by analysing the whole device. Step two proceeds by removing components for a more detailed study and follows up by examine each interface to find the flow of energy, information or materials. This document will present the documented summary of the reverse engineering that were made on a TJEP XP25 with the help of the steps presented below.



Figure 44 - Overview of Tjep XP25

The picture shows the length of the tool between the front of the jaws to the tool attachment.



Figure 45 - Length of Tjep XP25

This tool was custom adapted to be issued with a tool attachment so that it could be used in the scaled model of the ARCAS that were developed by Robotdalen during the proof of concept phase.



Figure 46 - Tying tool with adapter plate

Picture below shows a close up of the jaws that acts as guides for the wires.



Figure 47 – Close-up of jaws

This picture shows a close up of the feeder gear and the driven gear that puts pressure on the wire with the help of the spring that can be seen in the top right corner. To the left of both gears is a cone that helps the construction worker to manually feed the wire into the machine before using it.



Figure 48 – Close-up on Feeder mechanism

All tying wire is wound on to a coil that is placed on an angle on the side of the tool. The angle reduces the torque needed by the feeder motor to feed the wire throughout the tool.

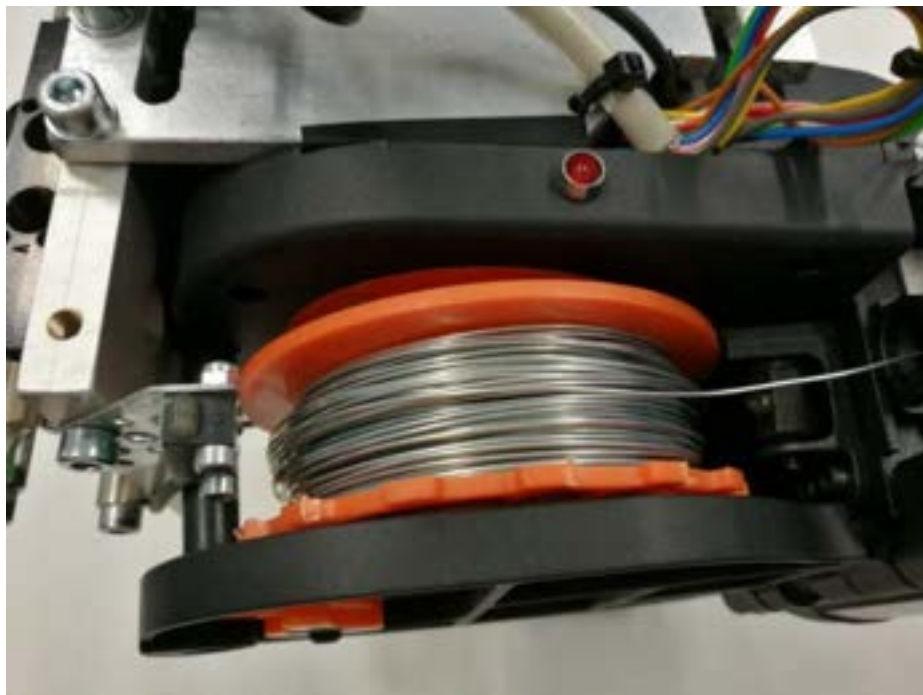


Figure 49 - Close-up on wire spool

A close up shot of the top guide with its side plates removed. Two separate wire canals can be seen in this picture, the top canal guides the wire leaving the machine and the lower canal takes care of the wire when it has been wound around the rebar.

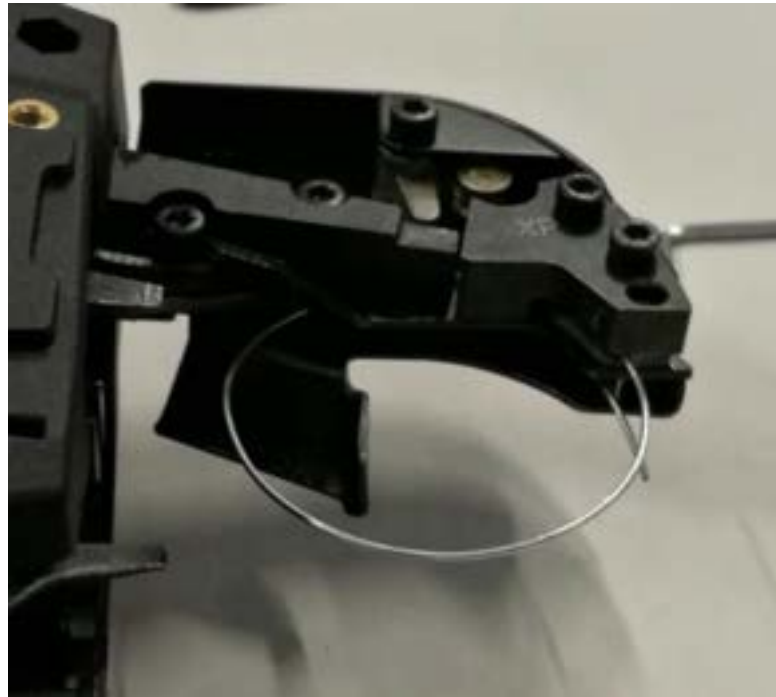


Figure 50 - Close-up on wire path

The mechanism twisting the wire into a knot can be seen in the middle of the tool. It grips the looped wire before twisting. As seen in this picture, the lower jaw is spring-loaded and mounted on an axis to ease tying of rebars.



Figure 51 - Close-up on wire loop

When most of the external components and functions had been examined the shell of the tool was removed to show the internal components. The complexity of the tool was higher than first thought. A blue solenoid valve, that can be seen in the top right, fills a multiple number of functions. It cuts the wire and at the same time moves a gear lever. A large circuit board containing all the important electrical functions can be seen in the bottom of the tool.



Figure 52 - Tying and cutter mechanism

APPENDIX D.

Practical Laboratory Tests

All information that was gathered during the practical laboratory test phase is presented in this thesis. It contains framework for testing, sources of error, how the tests were carried out, results and analysis. A lot of important information about the behavior of knots and rebar tiers emerged during the testing phase that was then used as a base for finding technical requirements. Several machines, knot designs and machine settings was tested multiple times and evaluated to find the most useful and reliable values.

Introduction

The future the ARCAS will be revolutionary for bridge construction and eventually for all large-scale construction of rebar cages. This will also result in a reformation of construction guidelines and framework regarding rebar cages. For example, the construction engineer will have to focus on higher loads for both the whole cage as well as on each knot. Skanska do not have standard methods for quality and strength control of the rebar cages at this point. Neither do the tying machines that are currently used come with information regarding values of strength and durability of ties. This means that all quality controls rely on the experience of the construction workers. With this in mind, a number of practical laboratory tests were carried out with the aim to get the best quality first-hand information about the strength and quality of knots made by commercially available tying tools. These tools are approved to be used for rebar cage construction, so the test information could then be used to find concrete values for a technical specification.

Research Questions

Before the execution of the test four research questions were formulated that would help to design the practical laboratory tests.

1. What is the tensile strength of different knot designs?
2. Will the knot unwind before the wire breaks?
3. Does the tension setting have any effect on the strength of the knot?
4. Will different knot designs affect the overall strength?

Method

The tests were done by using a Galdabini Quasar 100 tensile strength test machine some at the material lab at Mälardalen University in Eskilstuna. The machine measures the ultimate tensile strength of material by pulling or pushing with a pre-determined load at high precision.

Five different kind of tying machines were used during the tests. Some of which are used by Skanska as well as the new Knut 39 rebar tier. These machines are:

- MAX RB398
- MAX RB655
- MAX RB517
- TJEP RE-BAR XP25
- Knut 39

The tests were performed with both rebars tied together both in a cross pattern as well as collinear to each other. These are the most common ways to tie rebars together to form a rebar core. By doing this, realistic testing values could be generated from the tests. By using steel wire, the rebar assembly was placed inside the testing machine.

During the test of the ties with the TJEP XP 25 and the RB398 two 6mm rebars were tied together and placed in the machine. The same procedure was used during the tests of the remaining machines, but instead of 6 mm rebars, two 25 mm diameter rebars were tied together. The rebars and machines were selected to enable testing that resembles the automated rebar tying process.

All values acquired during the testing process were presented in the Galdabini software *Graph Work*, that is developed specifically for the testing machine. The test result was then compiled in tables.

Five tests were carried out for each rebar design configuration. If the test results would differ much, more tests would be carried out to ensure reliable result.



Figure 53 - Galdabini Quasar 100 tensile strength test machine

Source of Error

Some of error sources were found in the study that could affect the outcome of the testing phase. Results may vary depending on the location of which the tie is placed on the rebar. This is due to the patterns on the rebars. It provides a more realistic average value but might result in an unreliable maximal or minimal value.

Unbalance when placing the rebar assembly in the testing machine can also affect the testing result due to uneven loads in the tie. This may be a more important factor to consider during the set-up of the 6 mm rebars due to bending.

Result and Analysis

This chapter presents the result of the practical laboratory tests. The result consists of tables showing result values and graphs with load-deformation curves showing relations between the load [N] and deformation [μm]. All result values are presented in the tables below.

Table 7 - Test result XP25

TJEP XP25	Test no.	Limit of failure [N]	Comment
Crossbars			
	1	856,7	Knot begins to unwind at 400 N
	2	1921,0	Knot begins to unwind at 600 N
	3	1404,9	Knot begins to unwind at 500 N
	4	1502,1	Knot begins to unwind at 1000 N
	5	1484,3	Knot begins to unwind at 600 N
	Mean value	1433,8	

The TJEP XP25 testing phase was limited by the fact that the tool had been adapted to only operate when mounted to an IRB1200 industrial robot. As a result of this, only one type of test was carried out with a test series of five.

Table 8 - Test result RB398

MAX RB398	Test no.	Limit of failure [N]	Comment
Collinear bars			
	1	948,1	Knot begins to unwind at 500 N
	2	586,8	Knot begins to unwind at 500 N
	3	979,2	Knot begins to unwind at 500 N
	4	775,5	Knot begins to unwind at 500 N
	5	786,5	Knot begins to unwind at 500 N
	Mean value	815,2	

MAX RB398 got the lowest mean value when looking at the limit of failure for the knot. Even though the tool uses the same wire thickness and knot design as the TJEP XP25 the mean values differ by almost 600 N.

Table 9 - Test result RB517

MAX RB517	Test no.	Limit of failure [N]	Comment
Crossbars			
	1	1721,7	Knot begins to unwind at 1500 N
	2	1712,9	No obvious sign of unwinding
	3	1747,9	Knot begins to unwind at 600 N
	4	1551,2	Weak Knot, deformation before failure
	5	1825,5	Knot begins to unwind at 600 N
	Mean value	1711,8	
Collinear bars			
	1	1721,1	Rapid deformation at 1000 N
	2	351,8	Knot begins to unwind at 200 N
	3	1473,3	Knot begins to unwind at 500 N
	4	1324,8	Knot begins to unwind at 500 N
	5	1574,7	Knot begins to unwind at 600 N
	Mean value	1289,1	
Crossbar setting 5			
	1	900,5	No obvious sign of unwinding
	2	1928,2	Knot begins to unwind at 800 N
	3	1745,7	No wire failure
	4	1008,9	No obvious sign of unwinding
	5	1232,1	Knot begins to unwind at 900 N
	Mean value	1363,1	

The two first tests that were carried out for the TJEP XP25 differ from the rest of the test results, one reason for this can be faulty placing of the rebar assembly inside the testing machine. When looking at test subject number 4, the tie does not begin to unwind until 1000 N, comparing this to the other subjects it is almost twice as high. It was taken notice of that the knot did not have the possibility to move freely under load due to the wires used to fix the rebar assembly inside the testing machine. This is considered to be a case that could occur in a rebar case assembly so the test was not aborted.

When comparing the RB517 to the XP25 it is clear that the tie quality of the RB517 is higher than the XP25. Most of the ties tested during this process seem to start unwinding at around 500-600 N which is seemingly low when comparing it to the limit of failure of each tie. When changing tension settings on the machine the consistency in tying quality started to vary much compared to other tests. The RB655 uses 1,5mm wire as well as a different tying method compared to the XP25 and RB517.

Table 10 - Test result RB655

MAX RB655	Test no.	Limit of failure [N]	Comment
Crossbars			
	1	979,8	Knot begins to unwind at 800 N
	2	939,6	Knot begins to unwind at 800 N
	3	1236,6	Knot begins to unwind at 800 N
	4	961,3	Knot begins to unwind at 800 N
	5	1232,4	Knot begins to unwind at 800 N
	Mean value	1069,94	

By using a straight knot, compared to the top knot used by the previous tying tools, the RB655 managed to produce knots that started to unwind at 800 N with wire only wound once around the rebars.

Table 11 - Test result Knot 39

Knut 39	Test no.	Limit of failure [N]	Comment
Collinear bars			
	1	1032,6	No obvious sign of unwinding
	2	1160,3	No obvious sign of unwinding
	3	1143,3	No obvious sign of unwinding
	4	1122,3	No obvious sign of unwinding
	5	1138,6	No obvious sign of unwinding
	Mean value	1119,4	

Compared to other tying machines the XP655 has proven to have a consistent tying quality. Limit of failure got a mean value of 1096,9 N and a max value of 1236,6 N that might have occurred due to the wire not being able to unwind properly as a result of colliding with the steel wires used to mount the specimen inside the test machine. This was considered to be a case that could occur in real rebar cages and therefore the tests were not aborted.

Table 12 - Test result manual hand tie 1,5 mm

Hand tie 1,5 mm	Test no.	Limit of failure [N]	Comment
Single straight knot			
	1	928,3	Knot begins to unwind at 800 N
	2	1004,9	Knot begins to unwind at 800 N
	3	928,2	Knot begins to unwind at 800 N
	4	1177,5	Knot begins to unwind at 800 N
	5	1059,9	Knot begins to unwind at 800 N
	Mean value	1019,8	

Knut performed surprisingly well compared to the RB655. Knut also uses 1,5 mm wire that is only wound once around the rebar. But when looking at the design of the knot itself things begin to look different. The flat knot design of Knut proves to completely eliminate the factor of unwinding and the max value of the limit of failure is decided by the strength of the wire.

The hand ties were performing surprisingly good compared to the machine ties. The average limit of failure is the same, or even better than the limits of failure for the machines using 0,8 mm wire. When studying the knots during the testing it was noticed that the ties did not unwind much or unwind at all. A major difference found in this test is the difference between straight knots and top knots where the top knots began to unwind at low loads compared to the straight knots

Table 13 - Test result manual hand tie 0,8 mm

Hand tie 0.8 mm	Test no.	Limit of failure [N]	Comment
Double straight knot			
	1	743,7	No obvious sign of unwinding
	2	787,5	Knot begins to unwind at 600 N
	3	863,6	Knot begins to unwind at 600 N
	4	793,5	No obvious sign of unwinding
	5	858,8	No obvious sign of unwinding
	Mean value	809,4	
Quadruple straight knot			
	1	1737,6	No obvious sign of unwinding
	2	1787,5	No obvious sign of unwinding
	3	1770,3	Knot begins to unwind at 1200 N
	4	1821,2	No obvious sign of unwinding
	5	1792,7	No obvious sign of unwinding
	Mean value	1781,9	
Double top knot			
	1	894,6	Knot begins to unwind at 400 N
	2	730,9	Knot begins to unwind at 400 N
	3	742,5	Knot begins to unwind at 500 N
	4	751,9	Knot begins to unwind at 400 N
	5	788,7	Knot begins to unwind at 400 N
	Mean value	781,7	
Quadruple top knot			
	1	1721,8	Knot begins to unwind at 800 N
	2	1652,3	Knot begins to unwind at 800 N
	3	1687,9	Knot begins to unwind at 700 N
	4	1634,9	Knot begins to unwind at 1000 N
	5	1750,1	Knot begins to unwind at 900 N
	Mean value	1689,4	

When comparing the MAX RB655 to a single wound straight knot, both using 1,5 mm wire, the test result show that both the machine and the hand tie are performing similarly and that their characteristics are almost identical. The reason for this is believed to be that the RB655 uses an end twist style tie.

The major discovery that was done during the testing phase is that the knot itself has little impact on the total strength of the tie. Tests that were carried out showed that a simple hand tie had the strength similar to the one tied by the MAX RB517 but totally different characteristics even though the exact same wire was used. The difference in characteristics are due to the technique used to finish the tie. When tying by hand only the end parts of the wire were twisted together apart from the machine ties that twists the entire bundle of wire to form a knot.



Figure 54 - Design of a RB 655 and RB517 knot

A major difference between the test results of the RB655 and Knut was that the RN655 was limited by the knots ability to withstand unwinding, Knut on the other hand proved to withstand unwinding and only be limited by the strength of the wire itself.



Figure 55 - Design of two Knut 39 knots

Safety limit is a factor that was used in this study to easily describe the difference in characteristics between knots. This safety limit describes the relationship between load and deformation from the first wire break to complete tie failure. Two graphs show two similar knots, one tied by hand and the other tied by machine. Both knots experienced their first wire break close to 1800N but one tying technique had much higher safety limit.

When analysing these test results, it was clear that the wire broke before the tie itself. This led to the conclusion that the wire strength is one of the factors with the highest impact on the strength of the joint. Evaluating test results of different tying techniques made it clear that the number of times that the wire was wound around rebar have a bigger impact on the overall strength than the design of the knot itself. The reason for this is that the friction between wire and rebar is high enough to evenly distribute tension in the wire.

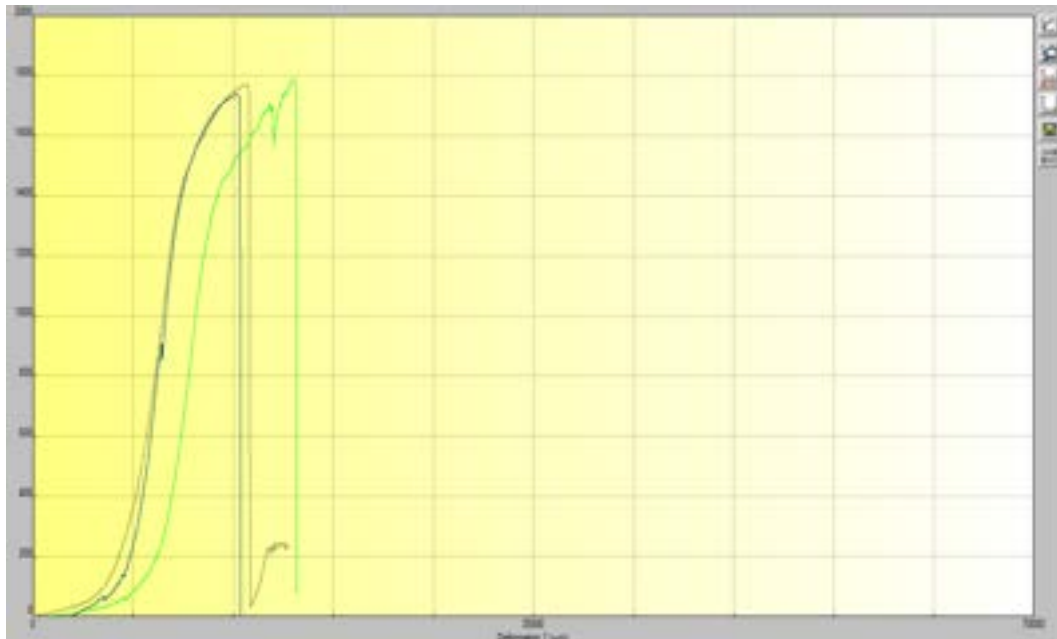


Figure 56 - Graph force – deformation comparison

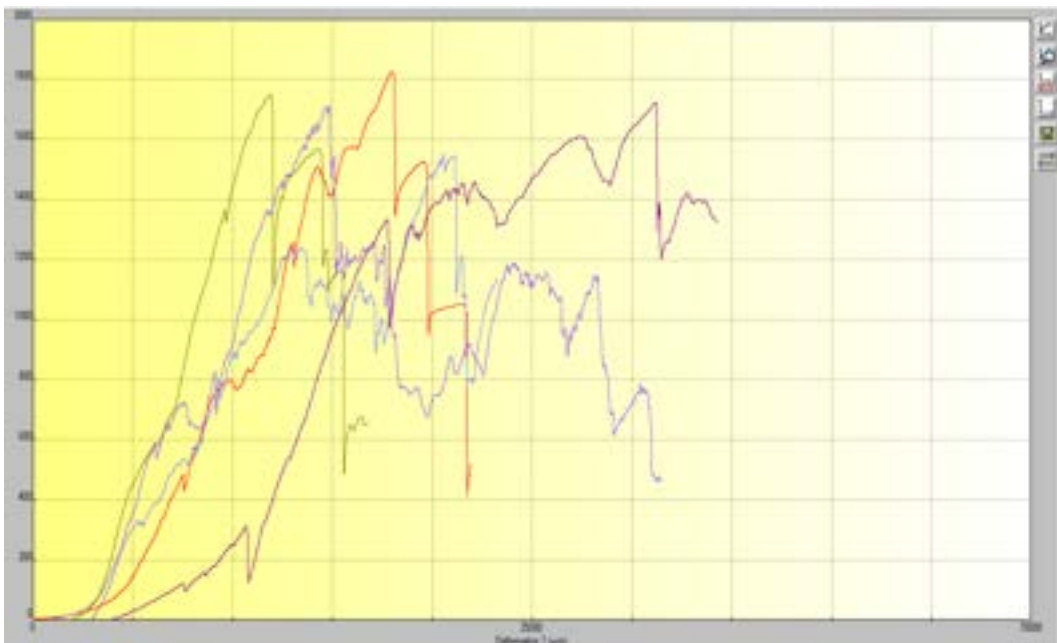


Figure 57 - Graph force – deformation comparison

Using a higher tension setting on the tying machine barely increases the rigidity between rebar while at the same time it lowers the overall strength of the ties. When studying this result closer it is the conclusion was made that the reason for this is due

to pretensions in the material. Aiming for a rigid construction may sacrifice ultimate strength in the rebar cage when looking at these test results.

This study has revealed some important factors and given substantial values to be considered during the development of the robotic tying tool. Some major weaknesses were revealed, such as design problems of the knot, inconsistency of knot quality and cases of bad test results.

Another interesting aspect that was looked into during the laboratory test phase was the amount of wire used by each machine to complete a tie. When looking into this factor there were some major differences.

MAX RB517 uses 1400 mm of 0,8mm tying wire for a tie that is wound four times around the rebar. This specific method of tying had a limit of failure with a mean value of 1711,8 N. Comparing this tying method with the RB655 that uses a 1,5 mm wire and only winds it once around the rebar a major difference can be seen. RB655 only requires 210 mm of wire to complete a tie, but a major drawback is the limit of failure with a mean value of only 1069,9 N.

The information that can be seen as the most positive was observed when measuring the amount of wire required to make a hand tie. By wounding 0,8mm tying wire four times around two rebars and making a top knot a limit of failure with a mean value of 1781,9 N was achieved by only using 600 mm of tying wire. This information shows that the straight knot achieves higher limits of failure compared to the MAX RB517 and still using only roughly 42% the amount of tying wire. By using an end twist tying method savings of 58% can be done. By applying this method to rebar cage construction both economic, environmental and weight savings can be made.

A last conclusion is that information about all the research questions were found and analysed.

APPENDIX E.

Interviews and Observations

This appendix contains the transcript from the interviews as well as the observations that were carried out as a part of the product definition phase. The interviews were carried out, and are transcribed in Swedish to prevent loss of information.

The interviews were carried out with employees at Skanska Anläggning and Ramirent Västerås.

Date: 29/9 2016 Respondents: Erkki Törmänen at Skanska Anläggning and Pontus Larsson at Ramirent.

Observations were carried out at Atlas Copco in Kalmar.

Date: 17/11 2016 Attending: Torkel Danielsson and Magnus Karlsson at Atlas Copco and Anders Thunell, Robotdalen.

Introduction

This document presents the interviews and observations done at the product definition phase. The interviews were conducted to people with knowledge in the field of rebar tying and tying tools, and the observation in the form of a visit at Atlas Copco Construction Tools in Kalmar.

To make the interviews easier and to avoid confusion all the interviews were conducted in Swedish. The answers given by the respondent are transcribed in Swedish to avoid loss or change of information. The interviews are transcribed from a vocal recording to prohibit loss of information. The text will present all that were discussed during the interviews with the exclusion of non-essential information that can have been spoken during the meeting.

Interviews

The following chapter will present the interviews in full.

Erkki Törmänen Operating officer, Skanska Anläggning

Vi träffar Erkki på Robotdalens kontor i Västerås den 29/9 2016 där intervjun skall hållas. När vi kommer in i möteslokalen börjar Erkki med att visa upp den manuella najningsmaskinen som han kallade den, som egentligen är en äldre modell av en Knipex najtång, tanken är att han skall visa oss hur det går till när man najar för hand för att visa på de fördelar som finns med detta, vilket är en stor anledning till att inte najningsmaskinerna används i så stor utsträckning som kan man tro. Vilket vi kommer tillbaka till senare. Intervjun fortsätter med att vi påbörjar det förberedda frågeformuläret som Erkki fått tagit del av några dagar tidigare.

- *Hur vanligt är det att ni använder najningsmaskiner idag?*

Idag används de främst hos Skanska anläggning som komplement. Han menar att det används mer och mer, men att det fortfarande främst är ett komplement pga. De begränsningar som verktyget har. Erkki nämner också att anledningen till att de använder maskinerna idag främst är pga. De ergonomiska fördelarna som maskinerna ger, förenklade arbetsmoment och tidsbesparingarna verktygen möjliggör.

- *Hur många olika modeller använder ni?*

På Skanska används främst verktyg från MAX, och vanligaste är modellerna i mellanklassen 397 och 398. För de grövre järnen används modell 500 som är anpassade för lite större järn. För länge sedan fick de testa på en japansk maskin som han glömt bort namnet på, det är enligt honom den bästa maskinen som de använt men av någon okänd anledning försvann de. Erkki börjar även beskriva de olika najtrådarna som används i maskinerna, att vissa maskiner använt en grövre tråd som inte är lika formbar. Enligt honom är en glödgad tråd att föredra då de är mycket mer böjbara. Dessa trådar börjar användas mer och mer, främst vid manuell najning.

- *Vilka modeller använder ni?*

Som nämndes på föregående fråga används maskiner från företaget MAX och då främst modellerna 397 och 398, modell 500 används vid najning av grövre tråd.

- *Om ni använder flera, i vilket syfte?*

Detta nämndes också vid föregående fråga, olika maskiner används för olika storlekar av järn, samt kan olika maskiner beroende på vad för typer av konstruktioner de ska användas till. T.ex. är vissa maskiner för stora för att klara av att naja en bur med begränsat utrymme mellan armeringsjärnen.

- *I vilka konstruktioner använder ni er av najningsmaskiner?*

Najningsmaskinerna används främst vid armering av bottenplattor och valv, men inte i hela konstruktionen. Byggarbetarna behöver skifta mellan najningsmaskin och att naja för hand pga. Att maskinerna inte kommer åt alla områden som skall najas samt att maskinerna lämnar en större knut som försämrar konstruktionen och därmed inte är tillåten överallt. Maskinerna används främst i de konstruktioner som inte kräver en så tätt najningsknut.

- *Hur tycker du att dessa maskiner presterar i jämförelse till manuell najning?*

Najningsmaskinerna är mycket snabbare, det är främsta orsaken till att de används. Men kvaliteten skiljer sig väldigt mycket åt. Det är en helt annan klass med en manuell najningsknut.

- *Vilka krav ställer ni på en najknut?*

Knutarna skall inte orsaka att det blir ett glapp mellan armeringsjärnen. De brukar ha som riktlinje att det skall gå att klättra på armeringsbjurarna när de är klara. Detta är något som inte maskinerna klarar av.

- *Hur kontrollerar ni kvalitén på najningen?*

Byggarbetarna utför manuella kontroller av najningarna genom att kolla hållfastheten på konstruktionerna. Oftast görs detta genom att de sparkar och rycker lite på dem för att se hur järnen reagerar. Upptäcker de glapp mellan järnen eller en allmänt klen och osäker konstruktion kompletteras de med manuella najningar som oftast gör att de blir stabilare.

- *Ser du några uppenbara problem med najning med maskiner?*

Det största problem byggarbetarna har är att maskinerna krånglar och att najtråden trasslar sig. De är väldigt känsliga för vind och fukt, det finns tillbehör som skall skydda mot detta men de är inte optimala då de försämrar handhavandet av maskinen. Dessa problem leder till att ledtiderna blir mycket längre än planerat och att flera av de fördelarna som maskinerna kan ge försvinner. Detta försöker de åtgärda genom att utföra kontinuerlig service av maskinerna.

- *I vilka applikationer ställs det högst krav på najningarna?*

Skanska ställer högst krav på armeringskonstruktioner av väggar, pelare och då flera armeringsjärn skall skarvas ihop. Och då grövre järn används, de grövsta järnen de använder är 32 mm i diameter och väger upp emot 60 kg.

Erkki nämner också att när de gjuter så skakar de också konstruktionerna med betongen. Detta leder också till ökade påfrestningar på armeringskonstruktionerna, och en uppenbar nackdel med maskinerna är då att de inte klarar av att dra åt järnen tillräckligt hårt mot varandra så konstruktionerna deformeras då de skakas.

- *I vilka fall anser du att ni inte kan använda er av najningsmaskiner?*

Då det är för många järn som är större, och där det är för trångt att komma åt. Detta är oftast inne i en konstruktion, då oftast i form av en större korg.

Intervjun fortsatte där vi gemensamt diskuterade olika varianter på maskiner, problem som han ser med dagens maskiner och vad vi behöver tänka på vid utveckling av vårt verktyg. Det kommer vidare på tal om stumparna som blir både vid manuell najning, men främst av maskinerna. Dessa kan bli väldigt stora av vissa modeller vilket gör att de kan inkräkta på täckskiktet och påverka konstruktionen negativt. Skanskas konstruktörer tar extra hänsyn på 1 dm vid sina konstruktioner av armeringskorgarna. Då dessa stumpar kan utföra en risk har går byggarbetarna runt med en bräda och slår ner dessa.

Ett sätt att lösa de klena knutarna maskinerna gör är att göra ett kors, alltså två stycken knutar som korsar varandra. Detta kan göra konstruktionen av burar etc. stabilare då de inte järnen kan röra på sig lika mycket. Men det kan ändå leda till problem om inte knutarna blir tillräckligt hårda då enskilda järn ändå kan röra sig fritt i igenom knutarna.

Skanska svetsar även ganska mycket, Erkki har främst erfarenhet av att svetsa stödjärn som håller ihop korgarna och gör dem stabilare. I dessa fall svetsar de dit extra järn på ett intervall av ungefär var 6:e järn. Den enda negativa aspekten som ses med svets är det extra materialet som går åt, dels då det kräver extra järn i en armeringskonstruktion men även pga. Att järnens hållfasthet halveras då de utsätts för svets. Erkki poängterar flera gånger under intervjun att svetsningen är överlägset bäst vid korgkonstruktioner.

Han nämner att det i andra länder är mycket vanligare att det tillåts att korgarna nästan uteslutande svetsas. B.la. vet han ett företag med namn VMS som är stationerande i Riga. Där helsvetsar de korgarna istället för att använda sig av najning. I De fall det har vart tillåtet har Skanska köpt korgar av dem.

I Sverige är det de enskilda företagen som har ansvar för att reglerna hålls, där ingår att kunna garantera att konstruktionerna kommer hålla. För Skanska är det den ansvarige konstruktören för den specifika korgen som alltså bestämmer om och hur mycket som får svetsas.

Intervjun fortsätter sedan genom att Erkki demonstrera hur man najar för hand. Där lägger han störst vikt i att visa hur man "straffar" när man najar. Det kan beskrivas som att efter att najtråden är lagd runt järnen så snurrar man tråden med hjälp av en najtång. Och att genom efter varje varv vrida till tråden ned mot järnen så stärks knuten, detta upprepas flertalet varv tills att knuten är tillräckligt stabil. Enligt Erkki är detta den avgörande faktorn till att dagens najningsmaskiner inte är tillräckligt tillförlitliga.

Vi återkommer sedan till problemen najningsmaskinerna har med vind och kyla. Erkki nämnde tidigare att det finns extra skydd och "vinterjackor" till maskinerna, detta pga. Att de använder sig av kretskort och oljor i maskinerna som inte klarar av ett kallare klimat. För att undvika detta skall även arbetarna förvara maskinerna inomhus majoriteten av tiden, vilket vid en applikation av ARCAS kommer bli ett stort problem. Några andra varianter än MAX apparater har inte Erkki så stor erfarenhet av, dock har han sätt varianterna som använder sig av klipps. Detta är tyvärr inte en metod som kan användas för ARCAS applikationer.

Intervjun avrundas med att Erkki beskriver att han tror att lösningen för ett sånt här system grundar sig i att använda en annan typ av najningsmetod än de som används i majoriteten av dagens maskiner. Erik visar en video på Wacker neuson DF16 som najar på ett tillsynes unikt sätt. Erkki säger att den liknar den japanska maskinen han nämnde tidigare. Formen på den är bättre för en applicering på en robot.

Pontus Larsson, Ramirent Västerås

En kortare intervju hölls med Pontus Larsson som jobbar som uthyrare på Ramirent Västerås som tidigare även har arbetat på Skanska Maskin. Intervjun gick ut på att få information om felkällor i dagens maskiner.

Pontus var ej medveten om utvecklingsprojektet under intervjun, frågorna riktades inte specifikt mot projektet utan mer om najningsmaskiner i allmänhet. Pontus anses vara en opartisk källa gällande de olika najningsmaskinerna som diskuterades.

- Vad har ni för najmaskiner här på Ramirent?

På Ramirent finns endast maskiner av märket MAX, men med ett relativt stort antal av deras olika modeller. Pontus påpekar att MAX är de maskiner som håller högst kvalitet och är de som till största del finns bland uthyrare i Sverige.

- *Vad är den vanligaste orsaken till fel i maskinerna?*

Enligt Pontus så är vanligaste felorsaken på de maskiner de har på uthyrning handhavandefel. Mer specifikt så är det slarv av personerna som brukar najmaskinen. Då trassel uppstår så är det vanligt att handhavande är oaktsam och drar bort trasset utan att istället använda en avbitartång för att klippa av najtråden och på nytt trä in den i maskinen.

Väder och miljö är enligt Pontus en stor risk ute på arbetsplatserna. Då kanalen där tråden ska åka är så pass tajt så har smuts en stor negativ påverkan på maskinen och najningen. Då maskinen har ett stort och komplext elektriskt system så är även fukt en bidragande faktor till att maskiner får problem eller helt enkelt slutar att fungera. Maskinen levereras med ett tillhörande skydd. Skyddet är främst tänkt att användas på vintern eller vid regn för att förhindra fuktskador på maskinen. Men det förekommer slarv med användning av detta skydd då det är opraktiskt.

Maskinen är försedd med ett automatiskt stopp som slutar att mata tråd om ett fel uppstår. Denna funktion är känslig så det innebär att små fel kan få maskinen att stänga av sig själv. Detta gör skötsel av maskinen ännu viktigare menar Pontus.

Fukt och stopp i systemet är vanligaste problemen. Ett annat problem som kan uppstå är nötning av den broms som finns vid rullen som håller najtråd. Då bromsen nöts finns risken att maskinen matar tråd i för hög hastighet och det blir trassel vid rullen.

Pontus förtydligar att det är en maskin som handhavande måste vara väldigt skötsam med då underhåll är svårt och dyrt på grund av maskinens komplicerade konstruktion och funktion.

- *Vilka metoder finns för att förhindra dessa fel?*

Pontus visar på en MAX 397 det, enligt honom, bästa sättet att ladda en maskin. Det är en metod som minskar risken att maskinen inte najar. Han visar att tråden bör träs igenom hela vägen genom maskinen.

För att förhindra problem med smuts och fukt så rekommenderar han att använda det extra skydd som levereras med maskinen. Men även att den ej bör lämnas utomhus vid till exempel fikaraster och vid slutet av arbetsdagen.

Vissa maskiner levereras med en speciell olja som skall droppas på ungefär var tionde rulle najtråd som förbrukas för att förhindra slitage och stopp i kanalerna. Dock har de slutat att skicka med denna olja då det är vanligt att arbetare håller den direkt in i systemet och därmed ökar risken att smuts fastnar.

- *Hur uppfattar du att maskinerna presterar i jämförelse med manuell najning?*

Enligt Pontus så är manuell najning fortfarande överlägsen både vad det gäller stabilitet och hållfasthet. Den manuella processen är dock självklart mer slitsam för arbetaren och tar mycket längre tid menar han.

Visit at Atlas Copco

Atlas Copco Construction Tools is a company located in Kalmar. The company designs, develops and manufacture hydraulic, pneumatic and petrol powered power tools. The aim of the visit was to be presented to the Knut 39 which is a new rebar tying machine that they are currently developing and testing in Kalmar. Knut 39 is the only rebar tying tool that is currently being manufactured in Sweden and thanks to contacts at Robotdalen this proved to be a perfect opportunity for a meeting. This gave the authors an insight in the development process of a handheld tying tool and increase the understanding of the functions of such tools.

Torkel Danielsson, project leader for the development of Knut 39 and Magnus Karlsson, test engineer, introduced the company and the tool. During the visit the authors were introduced and got to know Knut 39 and its functions. Demonstrations and minor testing was done to feel the handling and performance of the tool as well as the ties. Knut 39 is still under development which limited the amount of information that could be presented by Atlas Copco.



Figure 58 - Close-up Knut 39

The development of the Knut 39 was made with the focus on solving some of the problems tying machines have today, this includes the size of the tie and wire jams in the tool. In some rebar applications, the size of the knot may have a high impact on the quality of the end product. This depends on the distance between the rebars and the surface layer of the concrete which is limited. A big knot may result in that steel wire will overtop the surface layer or that moisture will reach the knot and result in a spot of rust. The Knut 39 solves this problem with a new design of the knot with a minimal height. The design of the knot also makes it much easier to make a cross tie, which is two ties in a cross section of two or more rebars that increases the stiffness of a rebar structure.



Figure 59 - Close-up on a knot tied by a Knut 39

Comparing Knut 39 to other rebar tiers it is obvious that the number of error sources have been reduced drastically. MAX and TJEP tiers are very sensitive for usage outdoors and especially during the Swedish winter season, Knut has an improved performance due to the electrical system used inside the tool. A new type of feeding system together with a copper coated steel wire eliminates the need of lubricants and

oils in the tool. This reduces the chance of dust collecting inside the tool which in turn reduces the risk of wire jams.

Another interesting application that was presented was that Knut is a smart tying tool, meaning that it can register if a tie is successful or not. This is very interesting when looking at a robotic rebar tier, because the robot itself cannot register if a tie has been successfully tied or not. When discussing robot applications, it would be possible for the tool to remember which tie that has been tied at a specific location, which would result in traceability and easy quality control.

When looking at the tool it looks like it has a bright future on the market for hand held rebar tiers thanks to its well-designed functions and innovative design. It has a number of features that could easily be adapted to work with a robot thanks to the communication and electrical system.

APPENDIX F.

QFD

This appendix contains the QFD house of quality matrix. Results of the Quality Function Deployment with evaluations and graphs can be found in chapter 4.2.6, Quality Function Deployment (QFD).

How?													
	mm	N	mm	N/A	N	+	-	mm	no.	no.	no.	IP	N/A
Who?	mm	N	mm	N/A	N	+	-	mm	no.	no.	no.	IP	N/A
What?	+	+	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+
Rebar management	3,5	6,75	4,75	5,25					1	1	0,5		2,25
Grip largest rebar	3	9	1	9					1	1	1		66
Hold largest rebar	3	9	9	9					1	1	1		90
Allow uninhibited linear movement	3	9							1	1			42
Reliable management	5	9							1	1			100
Rebar tying	5,6	4,5	3,5	3	3,5	3,5	3,5	0,833	0,667	0,333	0	1	0,667
Grip and adjust dislocated rebar	5	9	3	3					1	1	1,5	0	133
Fix rebar in place during tying process	3	9	9	3					1	1			85
Tie in all extreme cases	5	9	9	9	3	3	3	1	1	1			69
Continuous tying quality	5				9	9	9	1	1	1	3		195
Continuous supply of wire	5		3	3					1	1	3		115
Durable knots	5				9	9	9	3			1		95
Safety	5		1,5	3	3	3	3						105
No risk of human injury	5				3	3	3						82,5
No risk of damage to rebar cage	5		3	3	3	3	3				9	9	120
Miscellaneous	4	0,75	0,75	2,25	0,375	0,38	0,5	0,5	1,25	2,25	1,13	1,63	1,125
Compatible with tool changer	5									9			50
Easy to mount to robot	3		3	3							3	3	27
Easy to maintain	3		3	3					9	9	3	1	84
Be able to deal with all extreme cases	5	3	3	9				3					95
Compatible with all cage designs	5	3	3	3	3	3	3	1					85
Withstand demanding work environments	4								1			3	56
Withstand demanding weather	4										9		36
Few required work sequences	3										9	3	36
Characteristic Weight	60	46	60	30	30	30	30	9	18	26	2	13	28
Characteristic Weight Relative	15,4	11,8	15,4	7,7	7,7	7,7	7,7	2,3	4,6	6,7	0,5	3,3	9,3

APPENDIX G.

Technical Requirements

The full list of Engineering Requirements is presented in this appendix. The key specifications that have been the main focus are presented in a separate list in chapter 4.2.7, Engineering Requirements.

These are the requirements that have been developed from the function analysis, QFD, pre-study and discussion with supervisors and have been used as a basis for the development phase.

Table 14 – Table of technical specifications

nr.	Technical specification	Unit	Target value	Description
Market				
1	Developed for Skanska AB	N/A	-	The tool will be developed to the ARCAS
Rebar management				
2	Weight of rebar	kg	20	The required force that the tool can grip an object with
3	Grip diameter	mm	Ø 32	The diameter of an object that the tool is required to grip
4	Grip Width	mm	52	The diameter of the grip object and the maximum play
5	Linear rebar movement	mm	∞	The minimum distance a rebar can move freely in the tool
6	Rebar rotation	deg	∞	The minimum number of degrees a rebar can rotate freely in the tool
7	Rotation of tool	deg	∞	Number of degrees the tool can rotate freely
Rebar tying				
8	Consistency of tie	no.	∞	Number of ties that can be tied without deviation in quality
9	Strenight of tie	N	> 1000	The maximal load before tie failure
10	Tying speed	sec	< 3	Amount of time it takes for the tool to tie rebars
11	Tying dimensions	mm	32 ± 32 ± 12	The minimal dimensions of an object which is to be tied
12	Tying width	mm	100	Minimum width of tying area
13	Size of knot	mm	< 100	The maximum size of a tie
14	Tie extreme cases	N/A	∞	The tool should be designed to allow any kind of extreme case possible
15	Accessibility of wire	g	∞	The minimum amount of wire accessible by the tool
Tool				
16	Max dimensions (L x W x H)	mm	600 x 80 x 150	Maximum outer dimensions of the tool
17	Number of components	no.	x → 0	The number of components making up the tool shall be as low as possible
18	Number of different components	no.	x → 0	The number of different components in the tool shall be as low as possible
19	Weight	kg	< 20	The maximum weight of the tool should be as low as possible
20	Complexity	N/A	-	Aim for as low complexity of tool design as possible
21	Store components	N/A	-	The tool must be able to store all required components
22	Pneumatics	N/A	-	Usage of pneumatic shall be the main source of force
23	Acceleration	m/s ²	> 1	Minimum acceleration that the tool must be able to withstand
Process				
24	Reliability	%	100	The percentage of actual up time
25	Exact process every time	N/A	-	No deviation in process quality or performance
26	Number of working sequences	no.	x → 0	Number of working sequences required to complete a process shall be as low as possible
Safety				
27	Risk of robot damage	N/A	-	There can be no risk of the robot being damaged by the tool
28	Risk of human injury	N/A	-	There can be no risk of human injury by the tool
29	Risk of rebar cage damage	N/A	-	There can be no risk of the rebar cage being damaged by the tool
Miscellaneous				
30	Water and dust resistance	IPXX	IP44	Water and dust resistance of the tool according to the International Protection Marking
31	Durability	N/A	-	The durability before failure or disability to complete a process sequence
32	Cost	SEK	0	The cost for the tool should be as low as possible
33	Human interaction	no.	0	The number of times human interaction is required to complete a process
34	Maintainability	N/A	-	The knowledge required to maintain the tool

APPENDIX H.

Concepts

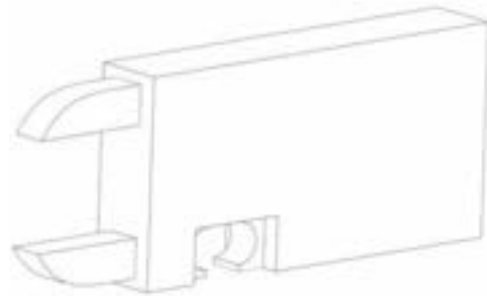
This appendix contains the concepts that consists of earlier ideas that were combined into new concept. Each concept is described with a text and a wire frame visualisation that shows the concept in a basic and simple manner.

Nine concepts are presented in this appendix. These concepts were then evaluated, and one of these was then developed and moulded into a finished result.

Concept 1

Concept 1 is designed with *standard guides*, *flat knot* and a separate placed *vice function* as the grip function.

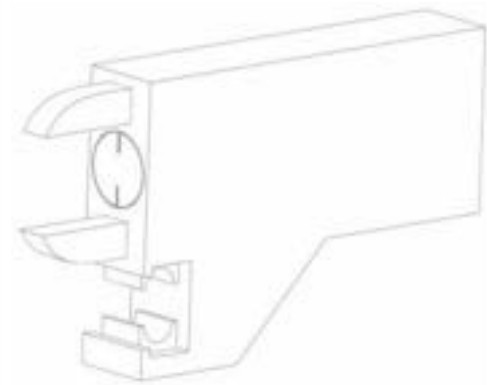
The design of the tool will give it *low complexity* but the placement of the grip function may give less freedom of moment during the grip and placement of rebars.



Concept 2

The second concept is similar to the first with the exception of where the grip function is placed. The concept is designed to tie a *flat knot*, use *standard guides* and a *vice grip function*.

This design may also give the robot less freedom of moment during the grip and placement of rebars.



Concept 3

This concept uses a *vice grip function* that is placed adjacent to the standard guides. During grip and movement of the rebars the vice grip will rotate 90 degrees that will allow the tool to tie rebars regardless of the gripper size.

This design will make the tool *medium complexity* and will add a working sequence for the tool comp



Concept 4

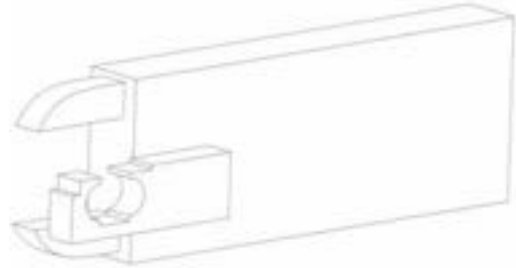
Two *standard guides* are responsible for guidance and wounding of the tying wire. Both guides are located on the side of the tool to give space for the grippers located adjacent to the guides on the opposite side of the tool. A pair of grippers are designed as vice and works independently to grip and hold rebars. The tie is a *flat knot*.



Concept 5

A *Vice style gripper* is located on one side of the tool body and runs linear with the body. With the help of this function it is possible to tie rebars regardless of gripper size. Two guides are responsible for guidance and wounding of tying wire. This concept uses a *flat knot*.

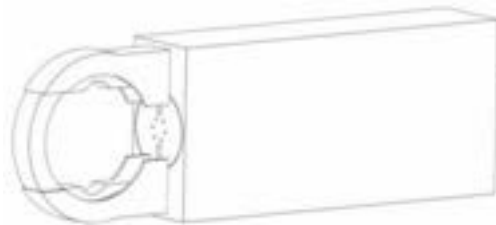
This type of design has a *medium complexity* due to the number of moving parts and number of working sequences.



Concept 6

Two guides containing a moving interlocking guide enables tying with a closed wire canal for safer tying. A pair of *polygrip plier style grippers* are located on the inside of the guides. These grippers are then used to grip and hold the rebars. This tool is suited for *straight knots*.

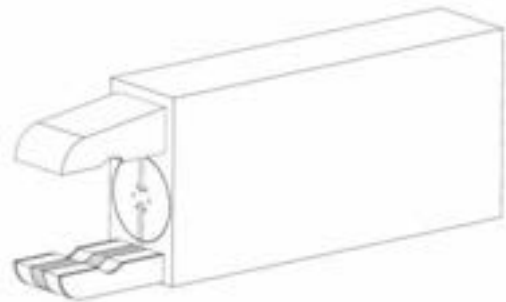
Because of a large number of moving components in a cramped space as well as a high number of working sequences this concept has a *high complexity*.



Concept 7

For this concept the steel wire will be wound around the rebars with the help of *standard guides* and *flat knot*. The tool will be able to grip the rebars by moving the lower guide, the *grip function* will therefore function as a *vice*.

This design will have a *high complexity* but will give advantages such as minimal use of space compared to the designs with separate grip function.

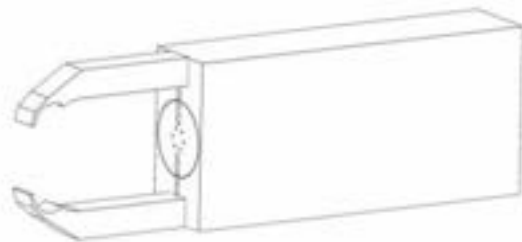


Concept 8

The gripper and guides have been combined in to a jaw to reduce the number of components needed and to save space. These grippers have a *polygrip plier* style design that allows handling of a rebar. The tool will grip the rebars by rotating around its mount on the body, this will result in a *v-shaped design*.

A *straight knot* is most suitable for this design.

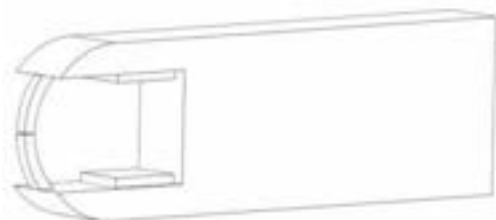
This is a *medium complex* design.



Concept 9

As in concept 6 this one uses the design of two *standard guides*, however in this case two moving guides will close the wire path. This will prevent the wire to jam through collision with rebars. With the use of two movable *polygrip plier* style gripper will allow the tool to grip and move rebars. This concept will be using a *straight knot* design.

The moving guides and the placement of the grip function will give the tool *high complexity*.



APPENDIX I.

FMEA

The Failure Modes and Effects Analysis table is presented in this appendix. This was used to evaluate the final concept to find sources of error in the design, the severity of these errors and the chances of them occurring.

A summary of the FMEA together with analysis and result is presented in chapter 4.4.3, Evaluate Product.

Component	Failure Mode	Potential Failure Cause	Local Failure Effect	End Failure Effect	Frequency	Severity	Detection Probability	RPN	Recommended Actions
Risk Analysis									
Joint									
Jaws	Rebars don't run freely	Grippers not designed for rebar surface	Slow / unstable process	Robot overload	5	3	3	45	Analyse behaviour of rebar. Improve grip surfaces
	Friction too high between rebar and grippers	Friction too high between rebar and grippers	Slow process	Robot overload	5	3	3	45	Analyse the forces of friction acting upon rebar
	Grip failure	Load exceeds 20 kg	Lost grip	Risk of damage to rebar cage	2	7	5	70	Ensure factor of safety
	Worn-out grip surfaces	Underestimation of wear from rebars	Unreliable grip	Risk of losing grip	8	2	6	96	Analyse wear on grip surfaces. Improve material specifications
Wire path									
Wire path	Process failure	Poorly designed wire path	Unreliable tying process	Incomplete process	3	6	2	36	Analyse physical wire path
	Wire jam	Rough wire canal	Unreliable tying process	Incomplete process	4	5	2	40	Develop prototype and analyse wire behaviour
		Dirt or dust in wire canal	Unreliable tying process	Incomplete process	3	4	2	24	Ensure IP classification. Add air canals for cleaning
	Wire collision with rebars	Bad design of wire path	Unreliable tying process	Incomplete process	3	5	2	30	Develop prototype and analyse wire behaviour
	Inability to feed wire	Unreliable wire path due to current angle of tool	Unreliable tying process	Unreliable process	7	5	2	70	Develop prototype and analyse wire behaviour
		Too low torque on feeder motor	Inability to complete process	Incomplete process	4	5	2	40	Find value of required torque
		Too low pressure between feeder gears	Inability to complete process	Incomplete process	3	5	2	30	Find value of required pressure
	Wear on wire canal	Sharp edges on wire	Unreliable feeding process	Unreliable process	6	4	7	168	Analyse wire end after cutting. Choose durable material for wire canals
Wire head									
Wire head	Knot failure	Friction too low between wire and wire head	Incomplete tying process	Rebar cage collapse	5	9	3	135	Analyse friction needed to tie a knot. Choose appropriate materials
	Failed cut	Too low torque on tying motor	Incomplete cut	Incomplete tying process	2	3	1	6	Optimise angle of cutting or upgrade motor
	Failed knot	Feeder before tied tying method	Incomplete tying process	Incomplete process	7	7	2	98	Develop prototype for testing
	Weak knot	Feeder before tied tying method	Knot failure	Rebar cage collapsing during transfer	5	8	8	320	Develop prototype for testing
		Low friction on tying wire	Knot failure	Rebar cage collapsing during transfer	5	9	8	360	Choose appropriate tying wire
Tool/electronics									
Tool/electronics	Electronic failure	Short circuit from due to moisture	Deactivated tool	Incomplete process	8	8	1	64	Improve design to ensure IP classification
		Short circuit from due to moisture	Deactivated tool	Risk of missing rebar	8	9	1	72	Lock system during electronic failure
Case									
Case	Oscillation in structure	Weak structure	Loss of precision	Oscillation transfers to gantry	2	4	4	32	Analyse excitation and frequency in structure during acceleration and deceleration
	Deformation	Deformations due to high accelerations	Deformed tool	Loss of precision	1	3	5	15	Analyse deformation during acceleration and deceleration
		Deformations due to high loads	Deformed tool	Ultimate failure	2	9	4	72	Analyse deformation during load
	Damage to case	Collision	Loss of IP class	Electronic failure	2	6	2	24	Collision free robot process

APPENDIX J.

Component Specifications and Drawings

A list of all components with their respective manufacturer, weight, and quantity is presented in the beginning of this appendix. A technical document for each standard component is then presented presenting relevant information about the product.

This appendix also contains the drawing of components that have been custom designed for this project. All drawings have been made as concept drawings, so full dimensions of each component will not be presented but only the ones of highest importance.

The number presented in the list is the location of the technical document or the drawing, it is categorised with technical documents as 1.xx and drawings as 2.xx.

Table 15 – List of components

Nr.	Component name	Custom part	Art.No.	Brand	Quantity	Weight/each [g]
Grip components						
1.1	Cylinder ADN-40-15 A-P-A		536288	Festo	2	402
1.2	Rod clevis SG-M10X1.25		6144	Festo	2	103
1.3	Swivel flange SNCB-40		174391	Festo	2	155
1.4	Swivel flange SNCL-40		174405	Festo	2	95
1.5	Push-in L-fitting NPQH-L-G18-Q4-P10		578280	Festo	4	16
2.1	Upper jaw	Yes			1	333
2.2	Lower jaw	Yes			1	352
	Upper grip surface	Yes			1	71
	Lower grip surface	Yes			1	61
1.6	Proximity sensor SMT-8M		574339	Festo	2	-
Tying components						
1.7	Motor RE 50		370354	Maxon motor	1	1100
1.8	Planetary gear GP 52		223084	Maxon motor	1	620
1.9	Encoder		110512	Maxon motor	1	15
1.10	Electromagnetic clutch VCEH 0.6		23655100	Ogura	1	600
	External wire head	Yes			1	174
	Internal wire head	Yes			1	82
	Double wire block	Yes			1	17
	Single wire block	Yes			1	8
	Clutch adapter plate	Yes			1	76
	Planetary adapter plate	Yes			1	28
1.11	Rotational seal Trelleborg TRA		1RA000500	Trelleborg	1	-
1.12	Ball bearing 61810-2RS1		61810-2RS1	SKF	1	52
	Mounting clamps	Yes			2	5
	Retaining ring				1	7
	Wire cutter	Yes			1	8
	Bushing	Yes			2	4
	polyurethane surface	Yes			2	-
Feeder components						
1.13	Motor EC 45		402685	Maxon motor	1	140
1.14	Planetary gear GP 42		203115	Maxon motor	1	360
	Gears	Yes			2	13
	Retaining ring				3	1
	Internal Wire path	Yes			1	-
	Spring-loaded gear lever	Yes			1	91
	Feeder mounting unit	Yes			1	18
	Gear lever spring				1	5
	Rotational spring				1	2
	Lock mechanism	Yes			1	3
	Internal wire path, screw				2	5
	Mounting clamp	Yes			1	4
Body						
2.3	Internal body right	Yes			1	780
2.4	Internal body left	Yes			1	784
2.5	External body front right	Yes			1	258
2.6	External body front left	Yes			1	258
2.7	External body back right	Yes			1	262
2.8	External body back left	Yes			1	204
	Rebar guard	Yes			2	201
Miscellaneous						
	ISO 10642 M3x12				3	1
	ISO 4762 M4x16				5	3
	ISO 4762 M3x30				8	2
	ISO 4762 M3x10				10	1
	ISO 4762 M3x8				12	1
	ISO 4017 M3x6				4	1
	ISO 4762 M8x60				6	30
	Torque nut ISO10512 M8x1.0				6	7
	DIN-912 M6x20				16	8
	EPOS4 Module digital positioning controller		504383	Maxon Motor	1	70
1.15	Tool attachment TA100-8		P0402	RSP	1	2200
	Jaw axis	Yes			2	23
	Jaw bushing	Yes			4	8
1.16	Standard O.D. tubing PUN-4X0.75-BL		159662	Festo	4	-
1.17	Push-in fitting NPQH-D-G18-Q4-P10		578352	Festo	4	10
	Rubber seals external body	Yes			5	-
	Rubber Seals internal body	Yes			2	-
1.18	Tub clip		3635	Festo	2	-

1.1 Cylinder ADN-40-15-A-P-A

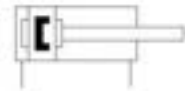
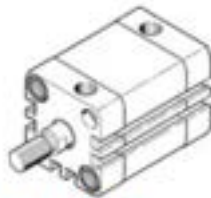
compact cylinder ADN-40-15-A-P-A

Part number 536291

★ Core product range

Per ISO 21287, with position sensing and external piston rod thread

FESTO



Data sheet

Feature	values
Stroke	15 mm
Piston diameter	40 mm
Piston rod thread	M10x1,25
Cushioning	P: flexible cushioning rings/plates at both ends
Assembly position	Any
Conforms to standard	ISO 21287
Piston-rod end	Male thread
Position detection	For proximity sensor
Varianis	Single-ended piston rod
Operating pressure	0,6 ... 10 bar
Mode of operation	double-acting
Operating medium	Compressed air in accordance with ISO8573-1:2010 [7:4:4]
Note on operating and pilot medium	Lubricated operation possible (subsequently required for further operation)
Corrosion resistance classification CRC	2 - Moderate corrosion stress
Ambient temperature	-20 ... 80 °C
Impact energy in end positions	0,7 J
Theoretical force at 6 bar, return stroke	686 N
Theoretical force at 6 bar, advance stroke	754 N
Moving mass with 0 mm stroke	80 g
Additional weight per 10 mm stroke	37 g
Basic weight for 0 mm stroke	346 g
Additional mass factor per 10 mm of stroke	9 g
Mounting type	Optional with through hole with internal (female) thread with accessories
Pneumatic connection	G1/8
Materials note	Conforms to RoHS
Materials information for cover	Aluminium Anodised
Materials information for seals	TPE-U/PUR
Materials information for piston rod	High alloy steel
Materials information for cylinder barrel	Wrought Aluminium alloy Smooth anodised

1.2 Rod clevis SG-M10X1,25

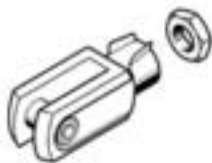
rod clevis
SG-M10X1,25

Part number: 8144

★ Core product range

With hexagonal nut, for swivelling cylinder mounting (piston rod side) as per DIN ISO 8140.

FESTO



Data sheet

Feature	values
Size	M10x1.25
Conforms to standard	DIN 71752 ISO 8140
Threaded connection	Female thread M10x1.25
Corrosion resistance classification CRC	1 - Low corrosion stress
Ambient temperature	-40 ... 150 °C
Product weight	103 g
Materials note	Free of copper and PTFE Conforms to RoHS
Material information, bolt	Steel Galvanised
Material information, clevis	Steel Galvanised
Materials information for nut	Steel Galvanised

1.3 Swivel flange SNCB-40

swivel flange
SNCB-40

Part number: 174391

★ Core product range

FESTO



Data sheet

Feature	values
Size	40
Conforms to standard	ISO 15552
Corrosion resistance classification CRC	2 - Moderate corrosion stress
Ambient temperature	-40 ... 90 °C
Product weight	155 g
Materials note	Free of copper and PTFE Conforms to RoHS
Material information, mounting	Aluminium die cast
Material information, bolt	steel, galvanized
Materials information for bearing	Plastic
Screw material data	steel, galvanized
Material information for fuse	Spring steel, galvanized

1.4 Swivel flange SNCL-40

swivel flange SNCL-40

Part number: 174405
★ Core product range

FESTO



Data sheet

Feature	values
Size	40
Conforms to standard	ISO 15552 (previously also VDMA 24652, ISO 6431, NF E49 003.1, UNI 10290)
Corrosion resistance classification CRC	2 - Moderate corrosion stress
Ambient temperature	-40 ... 90 °C
Product weight	95 g
Materials note	Free of copper and PTFE Conforms to RoHS
Material information, mounting	Aluminium die cast
Materials information for bearing	Plastic
Screw material data	Steel Galvanised

1.5 Push-in L-fitting NPQH-L-G18-Q4-P10

push-in L-fitting NPQH-L-G18-Q4-P10

Part number: 578280

FESTO



Data sheet

Feature	values
Size	Standard
Nominal size	3 mm
Type of seal on screw-in stud	Sealing ring
Assembly position	Any
Container size	10
Design structure	Push/pull principle
Operating pressure complete temperature range	-0.95 ... 20 bar
Operating medium	Compressed air in accordance with ISO 8573-1:2010 [7: -] Water as per manufacturer's declaration at www.festo.com
Note on operating and pilot medium	Lubricated operation possible
Corrosion resistance classification CRC	3 - High corrosion stress
Food-safe	See Supplementary material information
Ambient temperature	0 ... 150 °C
Max. tightening torque	10 Nm
Product weight	16.3 g
Pneumatic connection, port 1	Male thread G1/8
Pneumatic connection, port 2	For tubing outside diameter 4 mm
Materials note	Conforms to RoHS
Materials information, housing	Nickel-plated brass
Materials information for thread seal	PPH
Release ring material data	Nickel-plated brass
Materials information for tubing seal	PPH
Hose clamping segment material data	High alloy steel, non-corrosive

1.6 Proximity sensor SMT-8M

proximity sensor SMT-8M-A-NS-24V-E-0,3-M8D

Part number: 574339

★ Core product range

Magnetic, contactless, for T-slot.

FESTO

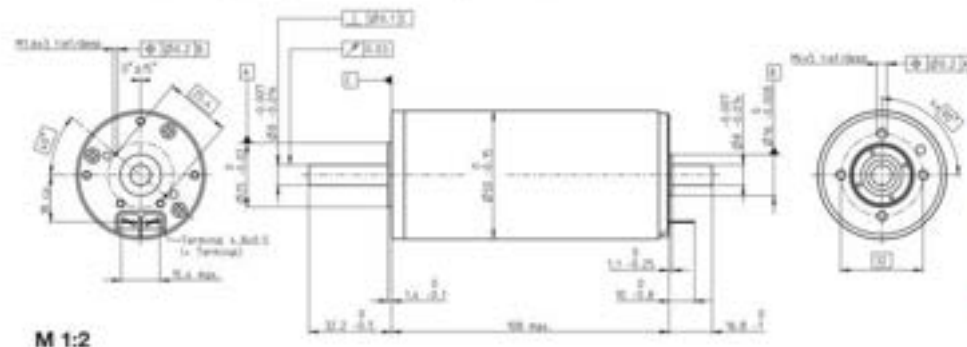


Data sheet

Feature	values
Design	for T-slot
Based on the standard	EN 60947-5-2
Authorisation	CEM Mark UL us - Listed (UL)
CE mark (see declaration of conformity)	to EU directive for EMC
Special characteristics	Oil resistant
Materials note	Free of copper and PTFE Conforms to RoHS Halogen-free
Measured variable	Position
Measuring principle	Magnetoresistive
Ambient temperature	-40 ... 85 °C
Switch output	NPN
Switching element function	Normally open contact
Switching output repetition accuracy in s/mm	0,1 mm
Switch-on time	≤ 1,3 ms
Switch-off time	≤ 1,4 ms
Max. switching frequency	180 Hz
Max. output current	100 mA
Max. output current in mounting kits	100 mA
Max. contact rating DC	2,8 W
Max. switching capacity DC in mounting kits	2,8 W
Voltage drop	≤ 1,5 V
Short circuit strength	Yes
Overload withstand capability	Available
Nominal operating voltage DC	24 V
Operating voltage range DC	5 ... 30 V
Polarity protected	for all electrical connections
Electrical connection	Cable with plug M8x1 3-pin Turnable threads
Connector exit direction	axial
Test conditions of cable	Bending strength according to Festo standard Test conditions on request Chain link trunking: 5 million cycles, bending radius 28 mm Torsion resistance: > 300,000 cycles, ±270°/0,1 m
Cable length	0,3 m
Cable attribute	Energy chain + robot
Cable sheath colour	Grey
Materials information, cable sheaths	TPE-UPUR
Mounting type	Tightened Incompatible to slot from above
Feature	values
Assembly position	Any
Product weight	8,9 g
Housing colour	Black
Materials information, housing	Nickel-plated brass PA-reinforced High alloy steel, non-corrosive
Operating status display	Yellow LED
Operating reserve display	LED orange
Ambient temperature with flexible cable installation	-20 ... 85 °C
Protection class	IP65 IP68 IP69K

1.7 Motor RE 50

RE 50 Ø50 mm, Graphite Brushes, 200 Watt



M 1:2

■ Stock program
■ Standard program
■ Special program (on request)

Part Numbers

Industrial Version IP54*	375355	375356	375357
	380080	380081	380082

Motor Data		375355	375356	375357
Values at nominal voltage				
1. Nominal voltage	V	24	36	48
2. No load speed	rpm	1950	1680	1300
3. No load current	mA	238	147	88.8
4. Nominal speed	rpm	1680	1420	1120
5. Nominal torque (max. continuous torque)	mNm	405	418	420
6. Nominal current (max. continuous current)	A	10.8	7.07	4.58
7. Stall torque	mNm	8920	8900	7370
8. Stall current	A	233	148	78.9
9. Max. efficiency	%	94	94	92
Characteristics				
10. Terminal resistance	Ω	0.155	0.244	0.606
11. Terminal inductance	mH	0.072	0.177	0.423
12. Torque constant	mNm/A	38.5	60.4	93.4
13. Speed constant	rpm/V	246	158	132
14. Speed / torque gradient	rpm/mNm	0.668	0.838	0.668
15. Mechanical time constant	ms	3.75	3.74	3.78
16. Rotor inertia	gcm ²	536	560	542

Specifications

17. Thermal resistance housing-ambient	3.8 K/W
18. Thermal resistance winding-housing	1.2 K/W
19. Thermal time constant winding	71.7 s
20. Thermal time constant motor	1370 s
21. Ambient temperature	-30...+100°C
22. Max. winding temperature	+125°C

Mechanical data

23. Max. speed	9500 rpm
24. Axial play at axial load < 11.5 N	0 mm
25. Axial play at axial load > 11.5 N	0.1 mm
26. Radial play	30 N
27. Max. force for press fits (static)	150 N
28. Max. radial load, 15 mm from flange	8000 N

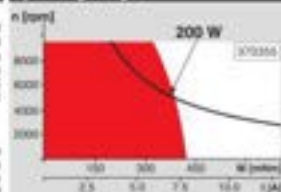
Other specifications

29. Number of pole pairs	1
30. Number of commutator segments	10
31. Weight of motor	1100 g

Values listed in the table are nominal.
Explanation of the figures on page 151

* Industrial version with radial shaft seal ring resulting in increased no load current, IP54 protection only if mounted on brush side, in compliance with maxon modular system.

Operating Range



Comments

Continuous operation
In observation of above listed thermal resistance lines 17 and 18 the maximum permissible winding temperature will be reached during continuous operation at 25°C ambient.
= Thermal limit.

Short term operation
The motor may be briefly overloaded (occurring).

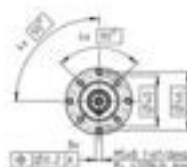
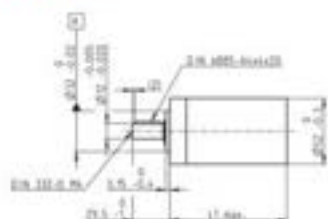
— Assigned power rating

maxon Modular System

Planetary Gearhead	Encoder	Recommended Electronics
1752 mm	Encoder HEDS 5640	Rules
4 - 30 Nm	300 CPT	ESCON Mod. 50/5
Page 354	3 channels	ESCON 50/5
Planetary Gearhead	Encoder HEDL 5540	ESCON 70/10
1762 mm	500 CPT	EPOS2 50/5
8 - 10 Nm	3 channels	EPOS2 70/10
Page 356	Encoder HEDL 5140	EPOS4 Module 50/5
	Encoder HEDL 5140	EPOS4 Comp. 50/5 CAN
	Encoder HEDL 5140	EPOS4 Module 50/15
	Encoder HEDL 5140	EPOS4 Comp. 50/15 CAN
	Encoder HEDL 5140	MAXPOS 50/5

maxon gear

Ceramic Version



M 1:4

Planetary Gearhead	straight teeth
Output shaft	40mm, steel
Bearing at output	prelubricated ball bearings
Radial play, 12 mm from flange	max. 0.06 mm
Axial play at axial load	< 0.54 mm
	max. 0.3 mm
Max. axial load (dynamic)	200 N
Max. force for press fits	300 N
Direction of rotation, drive to output	6000 rpm
Max. continuous input speed	-15...+80°C
Recommended temperature range	-40...+260°C
Exceeding range as option	
Number of stages	1 2 3 4
Max. radial load, 12 mm from flange	430 N 620 N 600 N 900 N

Part Numbers

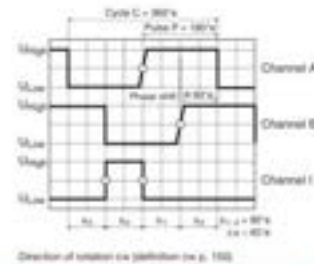
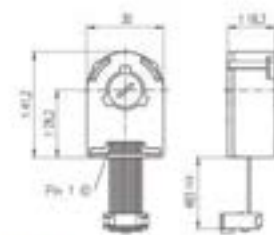
Special program on request		223090	223093	223099	223094	223097	223104	223109
Gearhead Data								
1	Reduction	3.5:1	12:1	43:1	91:1	150:1	219:1	548:1
2	Absolute reduction	%	%	%	91	150	219	548
10	Mass inertia	gcm ²	29.7	17.8	17.3	16.7	15.8	16.4
3	Max. motor shaft diameter	mm	10	10	10	10	10	10
Part Numbers								
1	Reduction	223091	223094	223099	223095	223098	223105	223110
2	Absolute reduction	4.5:1	15:1	53:1	112:1	188:1	263:1	678:1
10	Mass inertia	gcm ²	12	16.9	17.2	8.3	17.3	9.4
3	Max. motor shaft diameter	mm	8	10	10	8	8	8
Part Numbers								
1	Reduction	223096	223097	223099	223101	223106	223111	
2	Absolute reduction	%	19:1	68:1	126:1	230:1	334:1	756:1
10	Mass inertia	gcm ²	9.3	16.7	16.4	16.8	16.7	16.4
3	Max. motor shaft diameter	mm	8	10	10	10	10	10
Part Numbers								
1	Reduction	223098	223092	223098	223102	223107	223112	
2	Absolute reduction	%	21:1	78:1	156:1	257:1	441:1	936:1
10	Mass inertia	gcm ²	16.5	17.2	8.1	17.3	16.5	9.1
3	Max. motor shaft diameter	mm	10	10	8	10	10	8
Part Numbers								
1	Reduction	223097	223090		223100	223108		
2	Absolute reduction	%	26:1	81:1		285:1	488:1	
10	Mass inertia	gcm ²	26	219/23		163/9.54	439/9.9	
3	Max. motor shaft diameter	mm	9.1	9.4		16.7	9.6	
4	Number of stages		2	3		3	4	
5	Max. continuous torque	Nm	4	15	30	30	30	30
6	Max. intermittent torque at gear output	Nm	8	22.5	45	45	45	45
7	Max. efficiency	%	91	83	75	75	88	88
8	Weight	g	460	625	770	770	820	820
9	Average backlash (no load)	"	0.8	0.8	1.2	1.3	1.3	1.3
11	Gearhead length L1	mm	49.0	60.0	78.6	78.5	90.0	92.0



#	Model	Page	Sensor	Page	Broke	Page	Overall length [mm]	Motor width	gearhead length	bore/motor flange assembly parts	
RE 40, 150 W	186						120.7	156.1	149.6	163.1	163.1
RE 40, 150 W	186	MPI		309			131.5	167.5	161.0	174.5	174.5
RE 40, 150 W	186	HED, 50-40		309-402			140.8	156.8	170.3	183.8	183.8
RE 40, 150 W	186	HEDL 9140		405			174.1	190.1	203.6	217.1	217.1
RE 40, 150 W	186				A0 28	448	156.2	172.2	185.7	199.2	199.2
RE 40, 150 W	186				A0 28	447	164.2	180.2	193.7	207.2	207.2
RE 40, 150 W	186	HED, 50-40		309-402	A0 28	448	172.4	189.4	202.9	216.4	216.4
RE 40, 150 W	186	HEDL 9140		405	A0 28	447	184.8	200.8	216.1	227.6	227.6
RE 50, 200 W	187						157.1	173.1	186.6	200.1	200.1
RE 50, 200 W	187	HED, 50-40		400-402			177.8	189.8	207.3	220.8	220.8
RE 50, 200 W	187	HEDL 9140		430			219.5	235.5	249.0	262.5	262.5
RE 50, 200 W	187						218.5	235.5	248.0	262.5	262.5
RE 50, 200 W	187				A0 44	450	232.5	248.5	262.0	275.5	275.5
RE 50, 200 W	187	HEDL 9140		430	A0 44	450	232.5	248.5	262.0	275.5	275.5
EC 48, 170 W	252						129.1	145.1	158.6	172.1	172.1
EC 48, 170 W	252						168.5	182.0	195.5	195.5	195.5
EC 48, 170 W	252	Res 25		412			166.3	172.3	185.8	199.3	199.3
EC 48, 170 W	252				A0 32	448	171.8	187.8	201.3	214.8	214.8
EC 48, 170 W	252	HED, 50-40		400-402	A0 32	448	190.2	206.2	219.7	233.2	233.2

1.9 Encoder

Encoder HEDL 5540 500 CPT, 3 Channels, with Line Driver RS 422



- Block program
- Standard program
- Special program (on request)

Part Numbers

110012 110014 110016

Type

Counts per turn	500	500	500
Number of channels	3	3	3
Max. operating frequency (kHz)	100	100	100
Max. speed (rpm)	12 000	12 000	12 000
Shaft diameter (mm)	3	4	5



maxon Modular System

Motor	Page	Gearhead	Page	Brake	Page	Overall length [mm] / see Gearhead
EC-max 30, 40 W	264					62.6
EC-max 30, 40 W	264	GP 32, 1.0 - 8.0 Nm	343/345			•
EC-max 30, 40 W	264	KD 32, 1.0 - 4.5 Nm	347			•
EC-max 30, 40 W	264	GP 32 S	370-372			•
EC-max 30, 40 W	264			AB 20	444	98.4
EC-max 30, 40 W	264	GP 32, 1.0 - 8.0 Nm	343/345	AB 20	444	•
EC-max 30, 40 W	264	KD 32, 1.0 - 4.5 Nm	347	AB 20	444	•
EC-max 30, 40 W	264	GP 32 S	370-372	AB 20	444	•
EC-max 30, 60 W	265					84.6
EC-max 30, 60 W	265	GP 32, 1.0 - 8.0 Nm	343/345			•
EC-max 30, 60 W	265	KD 32, 1.0 - 4.5 Nm	347			•
EC-max 30, 60 W	265	GP 40, 3 - 15 Nm	380			•
EC-max 30, 60 W	265			AB 20	444	120.4
EC-max 30, 60 W	265	GP 32, 1.0 - 8.0 Nm	343/345	AB 20	444	•
EC-max 30, 60 W	265	KD 32, 1.0 - 4.5 Nm	347	AB 20	444	•
EC-max 30, 60 W	265	GP 40, 3 - 15 Nm	380	AB 20	444	•
EC-max 40, 70 W	266					81.4
EC-max 40, 70 W	266	GP 40, 3 - 15 Nm	380			•
EC-max 40, 70 W	266			AB 28	445	110.7
EC-max 40, 70 W	266	GP 40, 3 - 15 Nm	380	AB 28	445	•
EC-max 40, 120 W	267					111.4
EC-max 40, 120 W	267	GP 52, 4 - 30 Nm	388			•
EC-max 40, 120 W	267			AB 28	445	140.7
EC-max 40, 120 W	267	GP 52, 4 - 30 Nm	388	AB 28	445	•
EC-Apule 22, 90 W	271					70.1
EC-Apule 22, 90 W	271	GP 20/32	335/343			•
EC-Apule 22, 90 W	271	GP 32 S	370-372			•
EC-Apule 22, 120 W	272					87.8
EC-Apule 22, 120 W	272	GP 20/32	335/343			•
EC-Apule 22, 120 W	272	GP 32 S	370-372			•

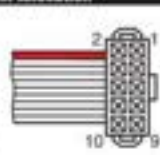
Technical Data

Supply voltage V_{CC}	5 V ± 10%
Output signal	EA Standard RS 422
driver used	DS2451
Phase shift Φ	90° ± 40°
Signal rise time	Typically, at $C_L = 25$ pF, $R_L = 2.7$ kΩ, 25°C: 180 ns
Signal fall time	Typically, at $C_L = 25$ pF, $R_L = 2.7$ kΩ, 25°C: 40 ns
Index pulse width	90° ± 40°
Operating temperature range	-40...+120°C
Moment of inertia of code wheel	± 0.6 gcm ²
Max. angular acceleration	250 000 rad/s ²
Output current per channel	max. -20 mA, max. 20 mA
Option	1000 Counts per turn, 2 Channels

The index signal I is synchronized with channel A or B.

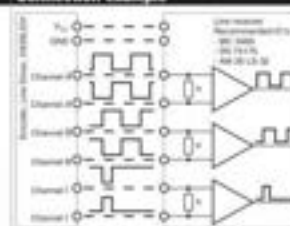
May 2016 edition / subject to change

Pin Allocation



- 1 VCC
- 2 VCC
- 3 GND
- 4 VCC
- 5 Channel A
- 6 Channel B
- 7 Channel C
- 8 Channel A
- 9 Channel B
- 10 Channel C

Connection example



Terminal resistance R_T = typical 120 Ω

maxon sensor 403

1.11 Rotational seal Trelleborg TRA



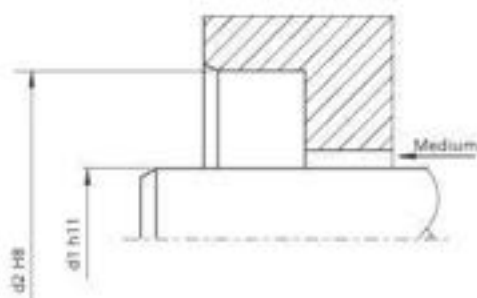
Installation Dimensions

Shaft diameter, d_1 h11	50.0 mm
Bore diameter, d_2 H8	62.0 mm
Width, b	7.0 mm

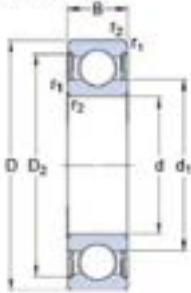
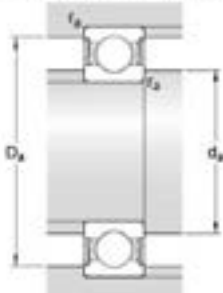
Seal Capabilities

Min. Temperature	-40.0 °C
Max. Temperature	110.0 °C
Speed max.	30.0 m/s
Pressure max.	0.05 MPa

Data shown are maximum values and cannot be used at the same time. E.g., the maximum operating speed depends on material type, pressure and temperature. Temperature range is also dependent on media used.

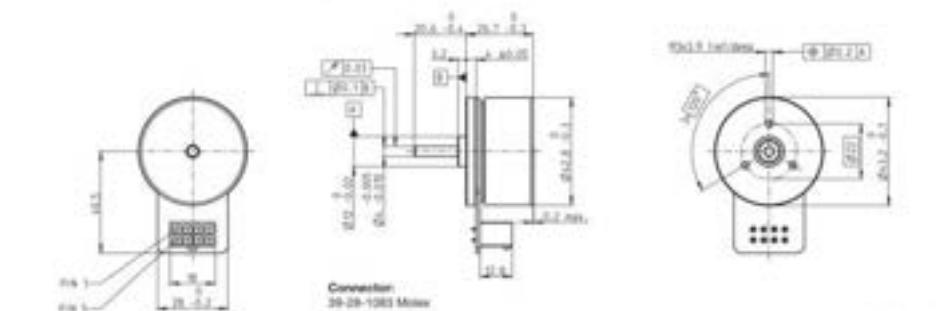


1.12 Ball bearing 61810-2RS1

SKF			
61810-2RS1			
Dimensions			
			
d	50	mm	
D	65	mm	
B	7	mm	
d ₁	≈ 55.1	mm	
D ₂	≈ 61.8	mm	
r _{1,2}	min. 0.3	mm	
Abutment dimensions			
			
da	min. 52	mm	
da	max. 55	mm	
Da	max. 63	mm	
ra	max. 0.3	mm	
Calculation data			
Basic dynamic load rating	C	6.7	kN
Basic static load rating	C ₀	6.8	kN
Fatigue load limit	P ₀	0.285	kN
Limiting speed		6000	r/min
Calculation factor	k _r	0.015	
Calculation factor	f ₀	17.2	
Mass			
Mass bearing		0.052	kg

1.13 Motor EC 45

EC 45 flat Ø42.8 mm, brushless, 70 Watt



maxon flat motor

M 1:2

■ Stock program
 ■ Standard program
 ■ Special program (on request)

Part Numbers

with Hall sensors

207102 402060 402066 402067

Motor Data (preselected)

Values at nominal voltage		24	30	36	48
1 Nominal voltage	V	24	30	36	48
2 No load speed	rpm	6115	6730	6330	3440
3 No load current	mA	234	194	188	46.1
4 Nominal speed	rpm	4960	4990	5090	2540
5 Nominal torque (max. continuous torque)	mNm	126	152	106	134
6 Nominal current (max. continuous current)	A	3.21	2.36	1.93	0.908
7 Stall torque	mNm	1460	1170	1100	915
8 Stall current	A	35.5	25.8	20.7	8.67
9 Max. efficiency	%	80	84	83	84
10 Characteristics					
10 Terminal resistance phase to phase	Ω	0.608	1.18	1.74	6.88
11 Terminal inductance phase to phase	mH	0.463	0.691	0.968	5.85
12 Torque constant	mNm / A	36.9	45.1	55.3	131
13 Speed constant	rpm / V	259	217	179	72.7
14 Speed / torque gradient	rpm / mNm	4.26	5.44	5.85	3.62
15 Mechanical time constant	ms	8.07	10.3	11.1	7.24
16 Rotor inertia	gcm ²	181	181	181	181

Specifications

17 Thermal resistance housing ambient	3.58 K/W
18 Thermal resistance winding housing	4.1 K/W
19 Thermal time constant winding	29.8 s
20 Thermal time constant motor	178 s
21 Ambient temperature	-40 ... +100°C
22 Max. winding temperature	+125°C
23 Max. speed	10000 rpm
24 Axial play at axial load < 4.0 N	0 mm
25 Radial play	0.14 mm (preloaded)
26 Max. axial load (dynamic)	3.8 N
27 Max. force for press fit (static)	50 N
28 Max. radial load, 0 mm from flange	1000 N
29 Max. radial load, 8 mm from flange	21 N

Other specifications

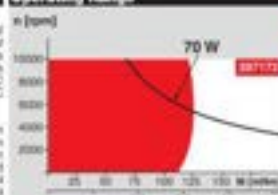
29 Number of pole pairs	3
30 Number of phases	3
31 Weight of motor	141 g

Values listed in the table are nominal.

Connection
 Pin 1: Hall sensor 1*
 Pin 2: Hall sensor 2*
 Pin 3: V_{CC} 4.5 ... 18 VDC
 Pin 4: Motor winding 3
 Pin 5: Hall sensor 3*
 Pin 6: GND
 Pin 7: Motor winding 1
 Pin 8: Motor winding 2
 *Internal pull-up (7 ... 13 kΩ) on pin 3
 Wiring diagram for Hall sensors see p. 37

Cable
 Connection cable Universal, L = 500 mm **330380**
 Connection cable to EPOS, L = 500 mm **354045**

Operating Range



Comments

Continuous operation
 In observation of above listed thermal resistance (lines 17 and 18) the maximum permissible winding temperature will be reached during continuous operation at 25°C ambient.
 = Thermal limit.

Short term operation
 The motor may be briefly overloaded according to the assigned power rating.

maxon Modular System

Overview on page 20-27

Planetary Gearhead Ø42 mm 3 - 15 Nm Page 301	Spur Gearhead Ø45 mm 0.5 - 2.0 Nm Page 303	Recommended Electronics: Notes Page 36 ESCON 36-0 EC 417 ESCON Mod. S04 EC-S 417 ESCON Module S0/S 417 ESCON S0/S 418 DEC Module S0/S 420 EPOS2 Module 26/3 424 EPOS2 24/S, S0/S 425 EPOS2 P 24/S 428 EPOS4 Module S0/S 431 EPOS4 Comp. S0/S CAN 431 MAXPOS S0/S 435	Encoder MLE 256 - 2048 CPT, 2 channels Page 319

Option
 with Cable and Connector
 (Ambient temperature -20 ... +100°C)

April 2016 edition / subject to change

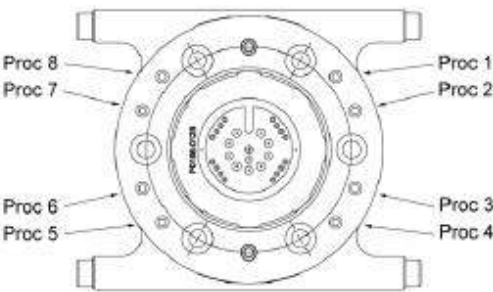
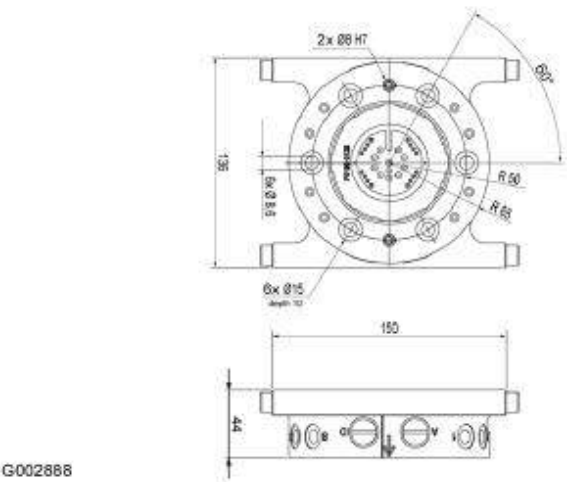
maxon EC motor 301

1.15 Tool attachment TA100-8

2 Technical Specification

2.2.2 Tool Attachment

Tool Attachment, TA 100-8, Square



Technical Data

Weight		2,2 kg
Air channels	Number of air ducts	8
	Air connection	G1/8"
Article number	Square plate	P0402

1.16 Standard O.D. tubing PUN-4X0,75-BL

plastic tubing PUN-4X0,75-BL

Part number: 159662

★ Core product range

Standard O.D. tubing, for QS plug connectors, CN and CK polyurethane fittings (not approved for use in the food industry).

FESTO



Data sheet

Feature	values
Outside diameter	4 mm
Bending radius relevant for flow rate	17 mm
Inside diameter	2,6 mm
Min. bending radius	8 mm
Temperature dependent operating pressure	-0,95 ... 10 bar
Operating medium	Compressed air in accordance with ISO8573-1:2010 [7:-:-]
Material fire test	UL94 HB
Ambient temperature	-35 ... 60 °C
Authorisation	TUV
Product weight according to length	0,0089 kg/m
Pneumatic connection	für Steckanschö, Außen-Ø 4 mm for barbed connector internal diameter 3 mm with nut für Stecknippel innen-Ø 3 mm
Colour	blue
Shore hardness	D 52 +/- 3
Materials note	Free of copper and PTFE Conforms to RoHS
Materials information for tubing	TPE-U(PU)

1.17 Push-in fitting NPQH-D-G18F-Q4-P10

push-in fitting
NPQH-D-G18F-Q4-P10
Part number: 578352

FESTO



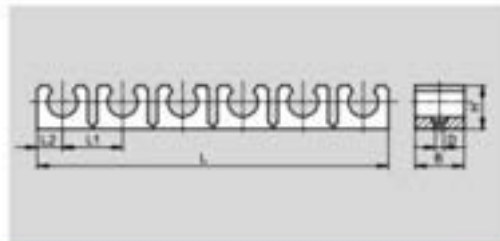
Data sheet

Feature	values
Size	Standard
Nominal size	3 mm
Assembly position	Any
Container size	10
Design structure	Push/pull principle
Operating pressure complete temperature range	-0.95 ... 20 bar
Operating medium	Compressed air in accordance with ISO8573-1:2010 [7...]
Note on operating and pilot medium	Water as per manufacturer's declaration at www.festo.com
Corrosion resistance classification CRC	3 - High corrosion stress
Food-safe	See Supplementary material information
Ambient temperature	0 ... 150 °C
Max. tightening torque	10 Nm
Product weight	10,2 g
Pneumatic connection, port 1	Female thread G1/8
Pneumatic connection, port 2	For tubing outside diameter 4 mm
Materials note	Conforms to RoHS
Materials information, housing	Nickel-plated brass
Release ring material data	Nickel-plated brass
Materials information for tubing seal	FPM
Hose clamping segment material data	High alloy steel, non-corrosive

1.18 Tub clip

Multi-tube holder KK
for securing tubing

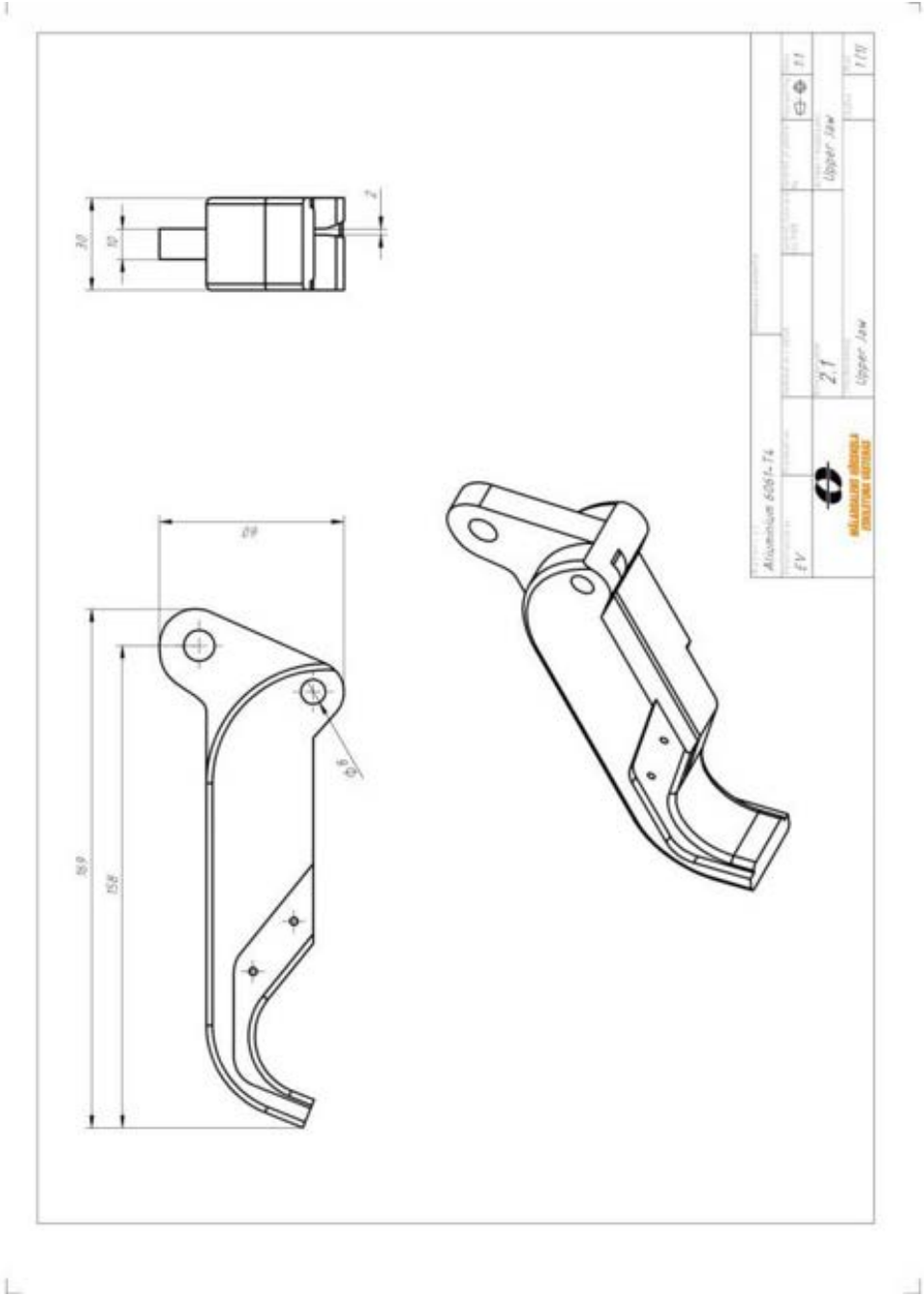
Note on materials (only with KK 9):
RoHS-compliant



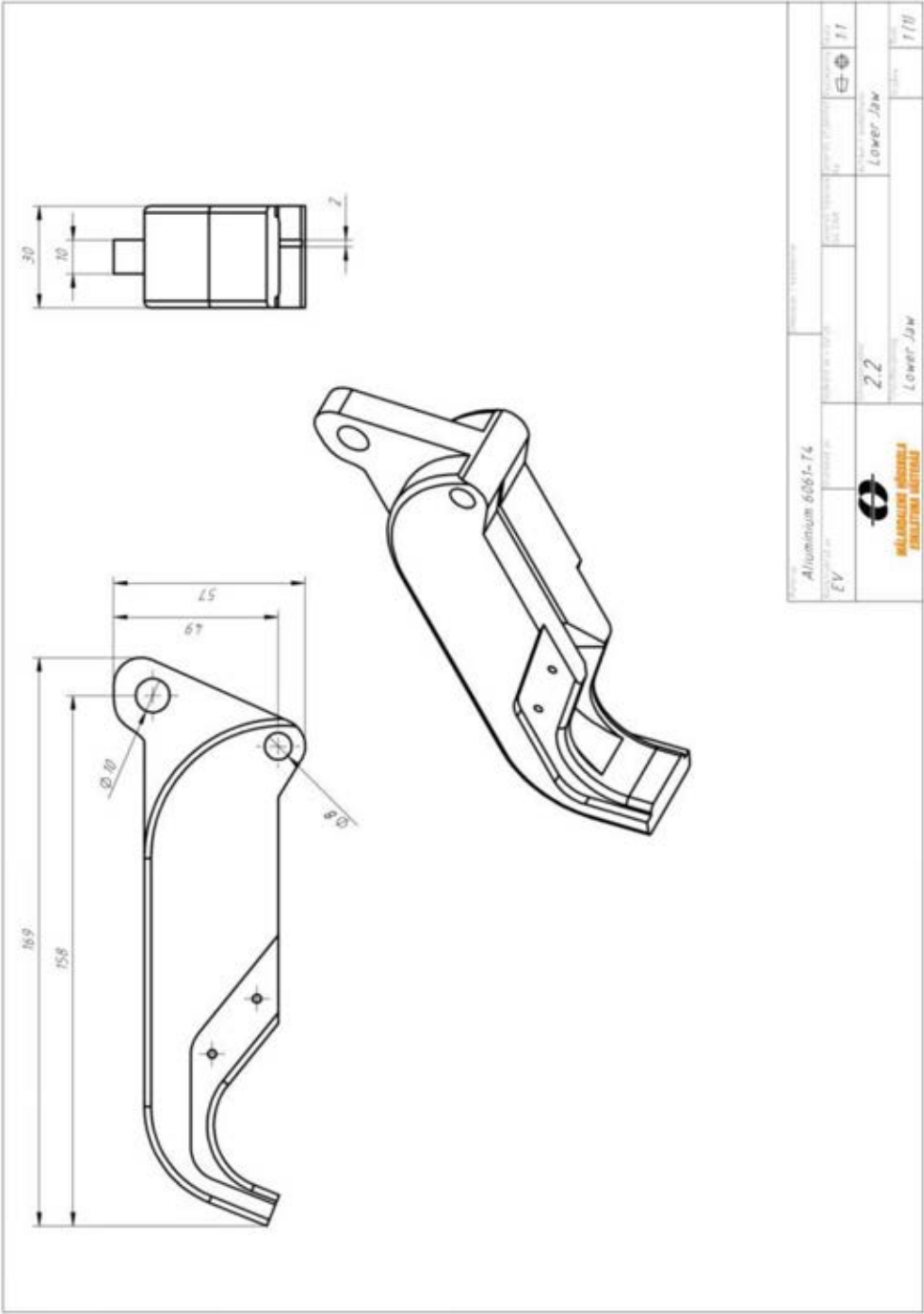
Dimensions and ordering data											
For tubing O.D. [mm]	Number of clamps	B	D [°]	H	L	L1	L2	Weight/piece [g]	Part No.	Type	PU ⁽¹⁾
4.3	10	12	2	9	98.6	10	4.3	1	3635	KK-3	10
6	9	14	3	9	94	10.5	5	5	2147	KK-4	10
8	10	14	3	11	142.5	14.5	6	10	2148	KK-6	10
11.5	6	18	3	16	128.5	22	9.25	18	2149	KK-9	10
17.6	4	20	5	23	117	30	13.5	52	4463	KK-13	10

(1) Packaging unit quantity

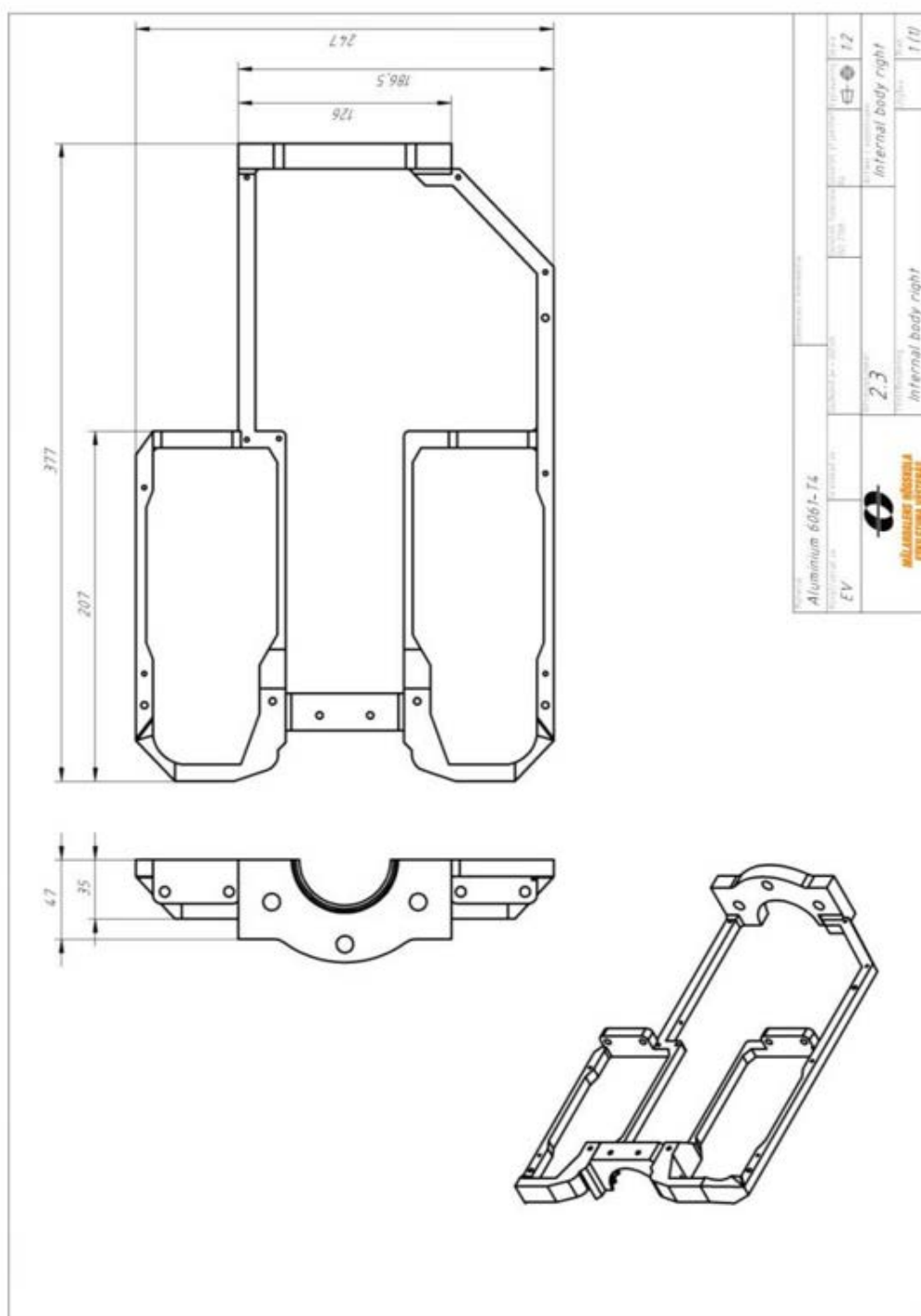
2.1 Upper jaw



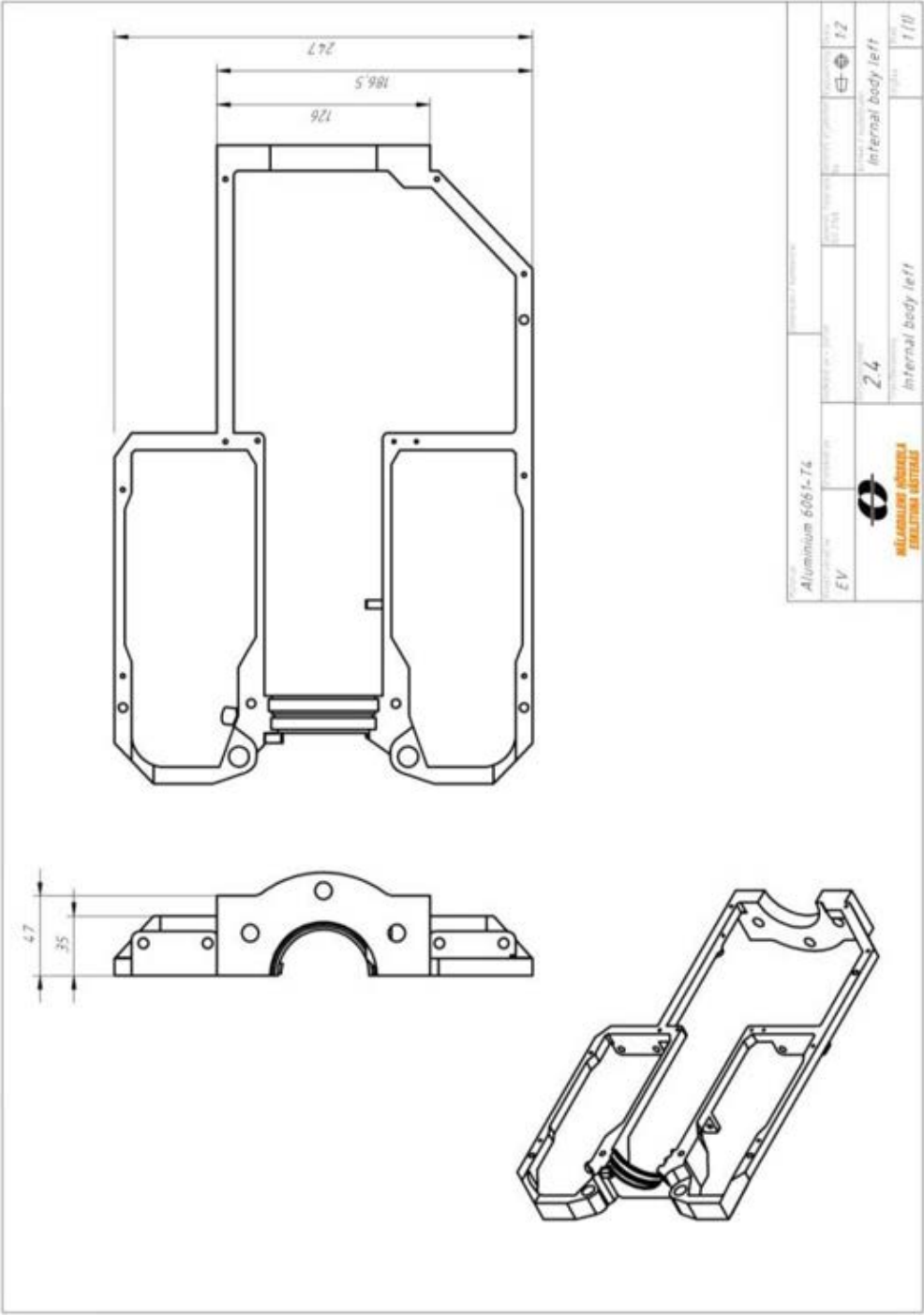
2.2 Lower jaw



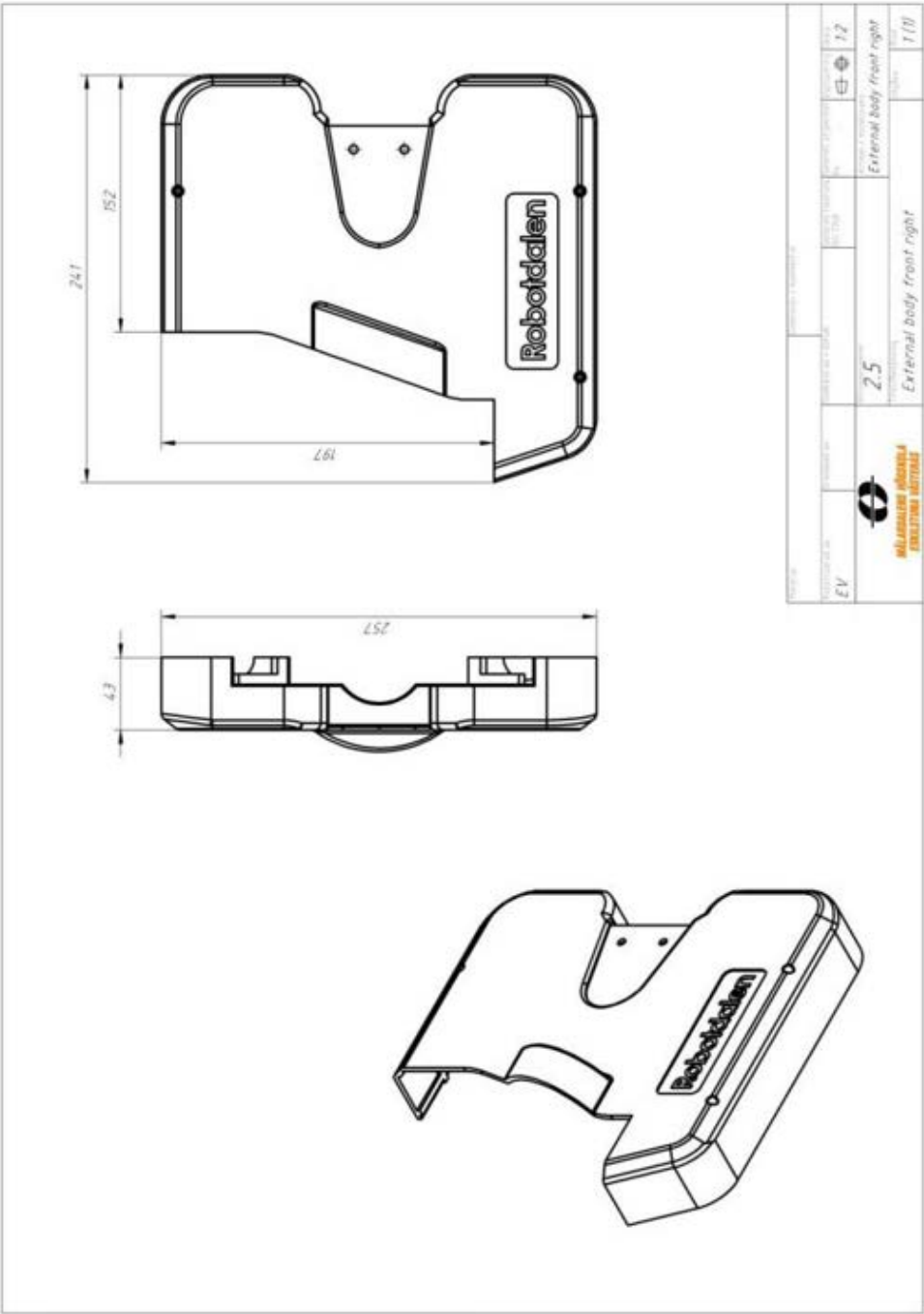
2.3 Internal body right



2.4 Internal body right

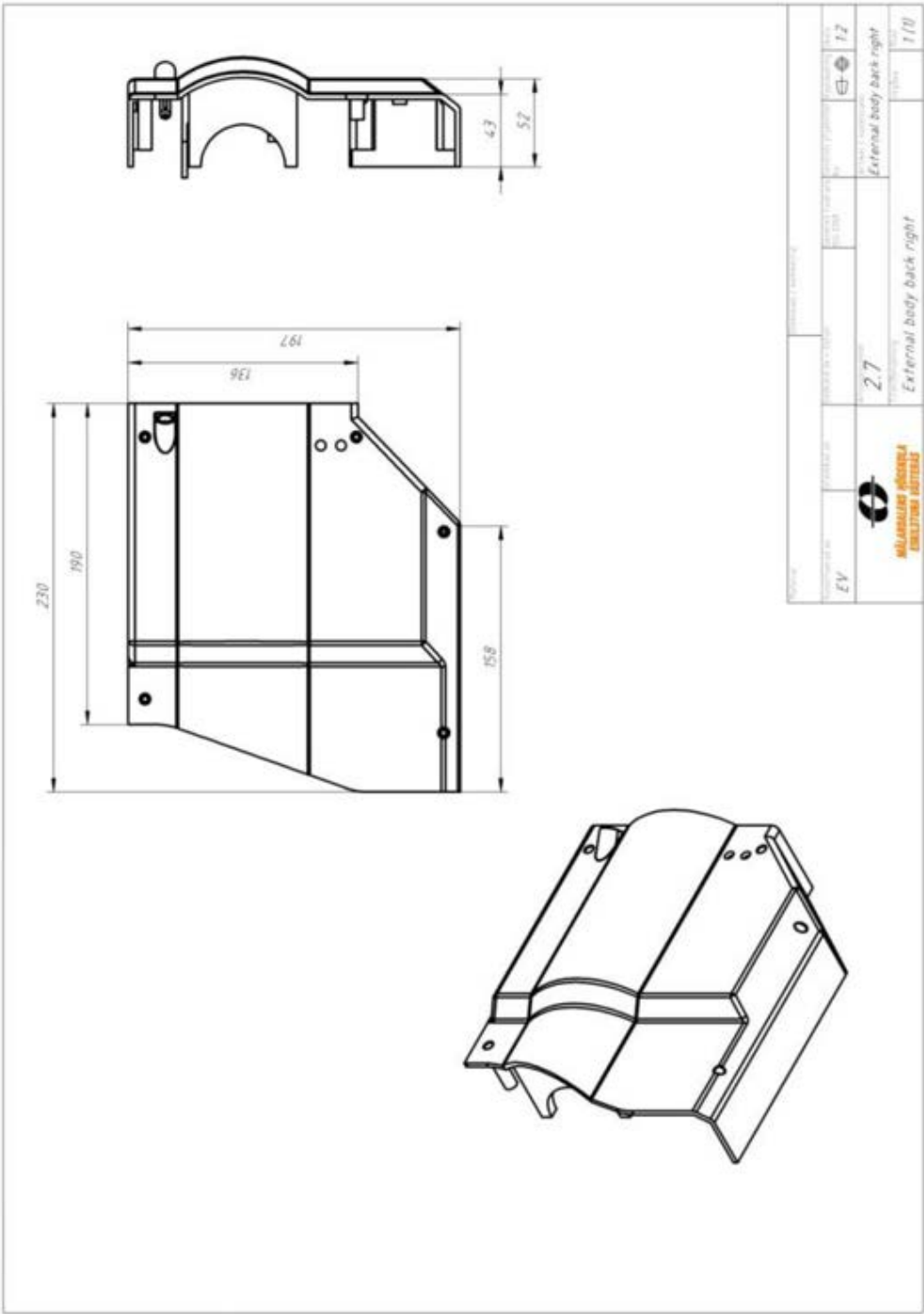


2.5 External body front right

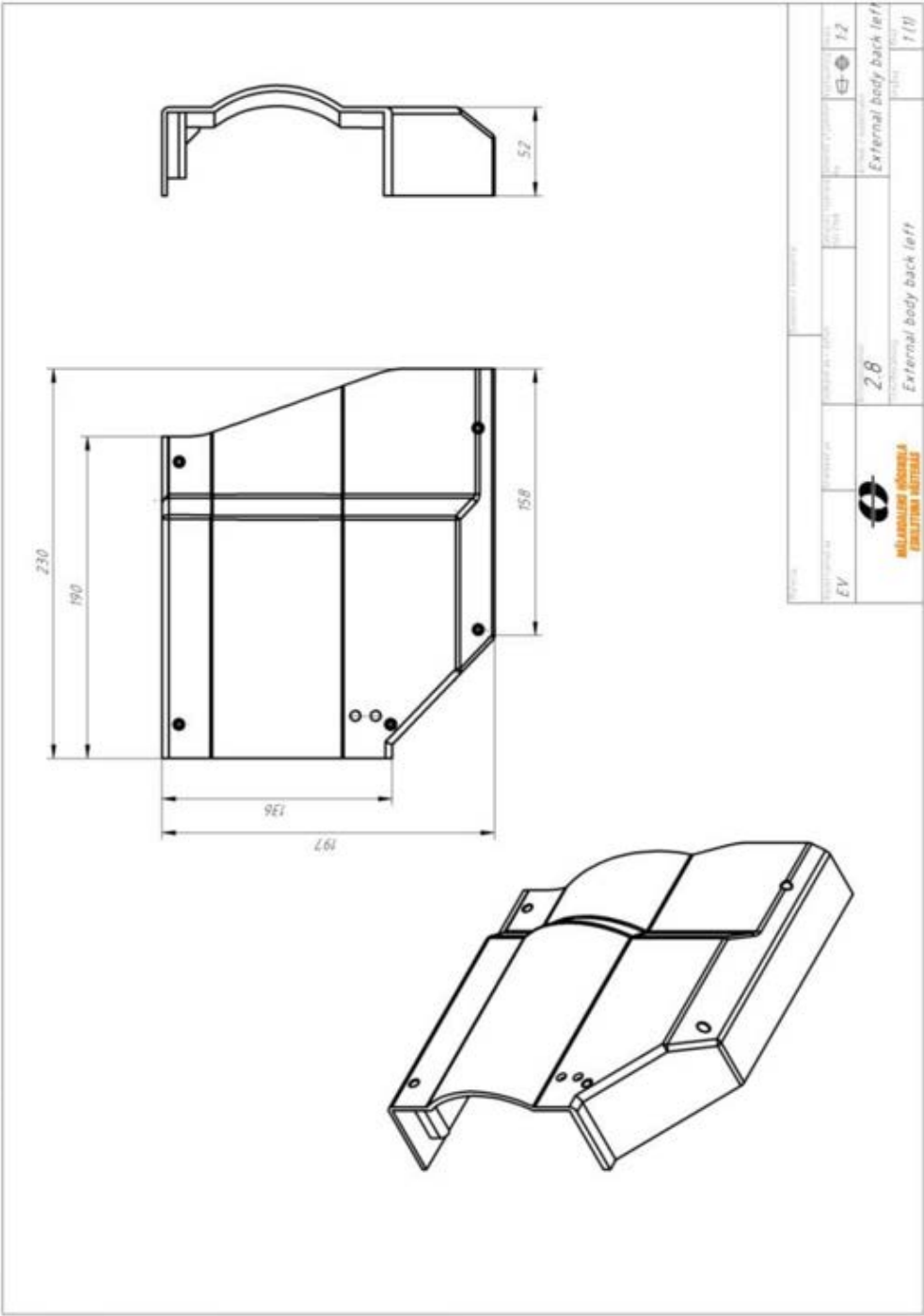


Technical drawing of a Skanska external body front left part, showing three views: a perspective view, a front view with dimensions (241, 152, 197, 257, 43), and a side view with dimensions (257, 43). The part features the Skanska logo and a handle.

2.7 External body back right



2.8 External body back left



Flexibel fixturering av armeringsjärn för robotohantering

Examensarbete

Grundnivå, 15 hp

Produkt- och processutveckling

Mikael Ahrel
Magnus Larsson

Rapport nr:

Handledare, Robotdalen: Hellström Erik

Handledare, Mälardalens högskola: Gustafsson Bengt

Examinator: Bjelkemyr Marcus

ABSTRACT

Skanska AB and Robotdalen had initiated a project with the aim of developing an automated rebar cage assembly station for bridge constructions. One step in the assembly station was to retrieve the rebar from a fixture using a robot system. The rebar was to be delivered to the fixture from an automatic rebar bending machine. This thesis work is regarding the designing of the fixture.

The fixture had to be able to position the rebar, allow for sufficient access for the robot system to grip the rebar and be flexible enough to handle at least three different bending configurations.

The research questions worked by in this thesis was how a fixture should be designed to fixate a rebar delivered from an automated rebar bending machine and how a fixture should be designed to allow access for a robot system.

The project followed the product development process suggested by David Ullman in his book "The Mechanical Design Process". In order to get a deeper understanding about the handling of rebars, a field study was carried out at Skanska Stomssystem AB in Bollebygd. Thereafter a function analysis and a specification of requirements were constructed in collaboration with Robotdalen. The function analysis and specification of requirements were used as the basis during the concept development process. Pugh's method was used as a support during the concept evaluation and selection.

The dimensioning and selection of components was made using calculations of strength and FEM-analyzes.

The thesis work resulted in a final concept that was documented by complete drawings. The final concept consisted of two chain conveyors and four supporting steel sheets mounted on wagons that were able to move inside a frame using motors mounted on the wagons.

The final concept solved all issues that were mentioned in the problem formulation section. The final concept also fulfilled most of the requirements that were set up in the specification of requirements. The final concept failed to fulfill the requirement of a maximum width of 2.5 meters. It was also unclear if the final concept fulfilled an additional four requirements.

SAMMANFATTNING

Skanska AB har i samarbete med Robotdalen inlett ett projekt med målet att utveckla en automatiserad armeringsstation för tillverkning av armeringskorgar vid brobyggnationer. Ett moment i armeringsstationen var att en robot ska hämta armeringsjärn från en fixtur som har tagit emot armeringsjärnet från en automatisk bockmaskin. Detta examensarbete handlar om att konstruera ovannämnda fixtur.

Fixturen måste kunna positionera armeringsjärnet, medge tillräcklig greppåtkomst samt vara flexibel nog att kunna hantera minst tre olika bockningskonfigurationer.

De frågeställningar som arbetades efter var hur en fixtur bör konstrueras för att fixera ett armeringsjärn som levererats från en automatisk bockmaskin samt hur en fixtur bör konstrueras för att möjliggöra greppåtkomst för en industrirobot.

Under projektet användes den produktutvecklingsprocess som beskrivs i David Ullmans bok "The Mechanical Design Process". För att få en djupare förståelse i hur man kan hantera armeringsjärn, gjordes ett studiebesök på Skanska Stomsystem AB i Bollebygd. I samråd med Robotdalen togs därefter en funktionsanalys och en kravspecifikation fram. Dessa låg till grund för konceptarbetet. För att utvärdera och välja koncept användes Pughs metod.

Dimensioneringen av fixturens komponenter utfördes med FEM-analys och hållfasthetsberäkningar.

Projektet resulterade i ett slutligt koncept som dokumenterades med fullständiga ritningsunderlag. Det slutliga konceptet bestod av två kedjetransportörer och fyra stödskenor monterade på vagnar, vilka kunde röra sig i en ram med hjälp av motorer monterade på vagnarna.

Det slutliga konceptet löste samtliga problem som nämndes i problemformuleringen. Det slutliga konceptet uppnådde även majoriteten av de krav som ställdes i kravspecifikationen. Det slutliga konceptet översteg kravet på en maxbredd på 2,5 meter. Det var dessutom oklart om konceptet uppnådde ytterligare fyra av kraven.

FÖRORD

Vi vill först tacka uppdragsgivaren Robotdalen, som har givit oss möjligheten att utföra examensarbetet hos dem. Ett stort tack till Erik Hellström som i sin roll som handledare givit oss stöd och handledning. Vi vill också skänka ett stort tack till Josef Holmner och Anders Thunell på Robotdalen.

Vi vill även tacka högskolans handledare Bengt Gustafsson för råd och vägledning.

Vi vill också tacka Fredrik Andersson som visade oss runt på Skanska Stomsystem i Bollebygd.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1.	INLEDNING	1
1.1.	BAKGRUND.....	1
1.2.	PROBLEMFORMULERING.....	3
1.3.	SYFTE OCH FRÅGESTÄLLNINGAR	3
1.4.	AVGRÄNSNINGAR.....	3
2.	ANSATS OCH METOD	4
2.1.	PRODUKTUPPTÄCKT	4
2.2.	PROJEKTPLANERING	4
2.2.1.	Gantt-schema	4
2.3.	PROJEKTDEFINITION	5
2.3.1.	Problemformulering.....	5
2.3.2.	Observation.....	5
2.3.3.	Intervju.....	5
2.3.4.	Funktionsanalys	5
2.3.5.	Kravspecifikation	6
2.4.	KONCEPTUTVECKLING	6
2.4.1.	Konceptgenerering.....	6
2.4.2.	Brainstorming	6
2.4.3.	Pughs metod.....	7
2.5.	PRODUKTUTVECKLING	7
2.5.1.	CAD.....	7
2.5.2.	Finita ElementMetoden.....	8
2.5.3.	DFMain.....	8
2.5.4.	FMEA	8
2.6.	PRODUKTSTÖD	9
2.6.1.	Ritningsunderlag	9
3.	TEORETISK REFERENSRAM.....	10
3.1.	ARMERINGSJÄRN.....	10
3.2.	INDUSTRIELL ROBOTIK	11
3.2.1.	Definition	11
3.2.2.	Användning.....	11
3.2.3.	Uppbyggnad.....	11
3.2.4.	IRB 1200 och IRB 4600.....	12
3.3.	BALKNEDBÖJNING.....	12
4.	GENOMFÖRANDE.....	13
4.1.	PRODUKTUPPTÄCKT	13
4.2.	PROJEKTPLANERING	13
4.2.1.	Gantt-schema	13
4.3.	PROJEKTDEFINITION	13
4.3.1.	Intervju.....	13
4.3.2.	Problemformulering/Observation	13
4.3.3.	Funktionsanalys	14
4.3.4.	Kravspecifikation	15
4.4.	KONCEPTUTVECKLING	16

4.4.1.	Konceptgenerering	16
4.4.2.	Konceptval	19
4.5.	PRODUKTUTVECKLING	19
4.5.1.	DFMain	19
4.5.2.	FMEA	20
4.6.	KOMPONENTVAL	20
4.7.	PRODUKTSTÖD	33
4.7.1.	Ritningsunderlag	33
4.7.2.	Prototypframtagning	33
5.	RESULTAT.....	35
6.	ANALYS.....	40
6.1.	ANALYS AV PROBLEMFORMULERINGAR	40
6.2.	ANALYS AV FRÅGESTÄLLNING	40
6.3.	ANALYS AV KRAVSPECIFIKATIONEN.....	41
7.	DISKUSSION, SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER.....	43
7.1.	DISKUSSION.....	43
7.2.	SLUTSATSER.....	43
7.3.	REKOMMENDATIONER.....	44
8.	KÄLLFÖRTECKNING.....	45

BILAGOR

BILAGA 1	Gantt-schema
BILAGA 2	Funktionsträd
BILAGA 3	Urval av skisser
BILAGA 4	Pughs matris
BILAGA 5	FMEA: Ram
BILAGA 6	FMEA: Vagn med kedjetransportör
BILAGA 7	FMEA: Vagn med stödskena
BILAGA 8	DFMain: Riktlinjer för att förenkla underhåll
BILAGA 9	DFMain: Riktlinjer för att förbättra tillförlitlighet
BILAGA 10	DFMain: Riktlinjer för att öka möjligheten att underhålla systemet
BILAGA 11	Ritningar
BILAGA 12	Datablad Lyftab Nylonhjul Typ 82
BILAGA 13	Datablad Lyftab Flänsjul
BILAGA 14	Datablad Iwis transportkedja C2040HP
BILAGA 15	Datablad Servomotor EMME-AS-40-M-LV ASB
BILAGA 16	Datablad Växellåda EMGA-40-P-G5-EAS-40
BILAGA 17	Datablad Servomotor EMME-AS-60-SK-LS-AMXB
BILAGA 18	Datablad Växellåda EMGA-60-P-G5-EAS-60
BILAGA 19	Datablad Maskinsko MN154 M10x50 H63 med fästhål från Eugen Wiberger

FIGURFÖRTECKNING

Figur 1-	Överblick armeringsstation	1
Figur 2-	Plockning av armeringsjärn	2
Figur 3-	Placering av armeringsjärn.....	2
Figur 4-	Ullmans produktutvecklingsprocess	4
Figur 5-	Armeringsjärn	10

Figur 6- De tre bockningskonfigurationerna.....	10
Figur 7- Närbild på kammar.....	11
Figur 8- Armeringsrullar	14
Figur 9- Riktningsmaskin.....	14
Figur 10- Koncept 1	17
Figur 11- Koncept 2	17
Figur 12- Koncept 3	18
Figur 13- Koncept 4	18
Figur 14- Koncept 5	19
Figur 15- FEM-analys konsol	22
Figur 16- Spänningsuppkomst vid FEM-analys av konsol	23
Figur 17- FEM-analys av motorfäste	23
Figur 18- Spänningsuppkomst vid FEM-analys av motorfäste	24
Figur 19- FEM-analys av upphängning	28
Figur 20- Spänningsuppkomst vid FEM-analys av upphängning.....	28
Figur 21- FEM-analys av stödskena	30
Figur 22- Spänningsuppkomst vid FEM-analys av stödskena.....	30
Figur 23- FEM-analys av upphängning	31
Figur 24- Spänningsuppkomst vid FEM-analys av upphängning.....	31
Figur 25 - Prototyp.....	34
Figur 26- Drivning av prototyp	34
Figur 27 - Fjäderfästen	34
Figur 28- Fixtur.....	35
Figur 29- Kedjetransportör.....	36
Figur 30- Kedjetransportör.....	36
Figur 31- Vagn med flänshjul	37
Figur 32- Vagn med stödskena	38
Figur 33- Drivning av vagn med stödskena	38
Figur 34- Vagn med stödskena	39

TABELLFÖRTECKNING

Tabell 1- Kravspecifikation.....	15
Tabell 2- Beräkningsdata	20
Tabell 3- Information transportkedja	21
Tabell 4- Information drev	21
Tabell 5- Beräkningsdata vid dimensionering av VKR-rör	25
Tabell 6- Beräkningsdata vid dimensionering av IPE-balk	32
Tabell 7- Analys av kravspecifikation	41

FÖRKORTNINGAR

CAD	Computer-aided design
DFMain	Design for Maintenance
FEM	Finita Elementmetoden
FMEA	Failure Modes and Effects Analysis

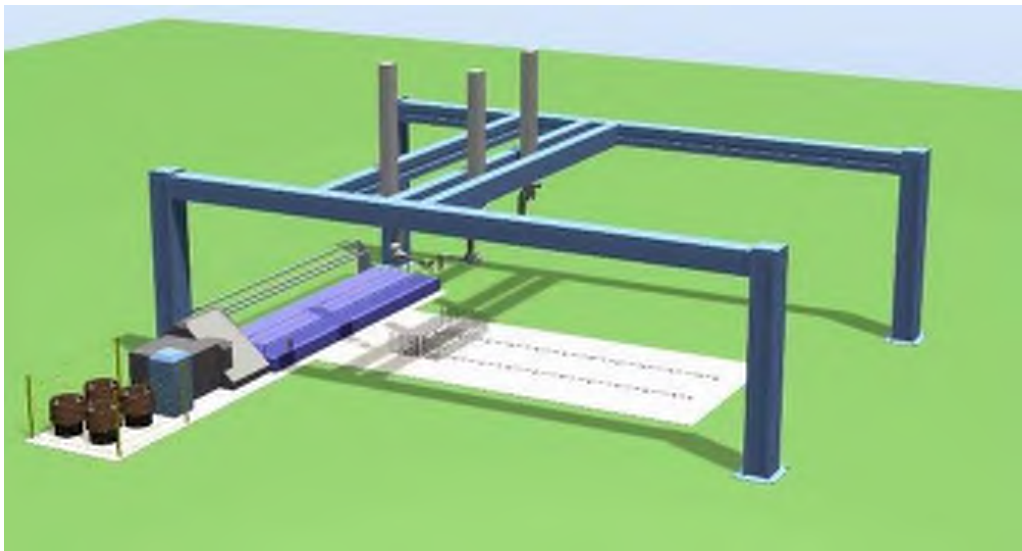
Ordlista

Armeringsjärn	Stänger av kolstål för armering av betong.
Armeringskorg	Består av en eller flera armeringsjärn som är hopmonterade med svetsning eller najning.
Bockmaskin	Maskin som används för att bocka armeringsjärn till önskad form.
Greppunkt	Punkt där robotverktyget greppar armeringsjärnet.
Fixtur	Anordning för att fixera objekt.
Kedjetransportör	Transportanordning med kedjedrift.
Prototyp	Funktionsmodell som ej behöver vara riktig till utseende eller tillverkningsmetod men till funktion.

1. INLEDNING

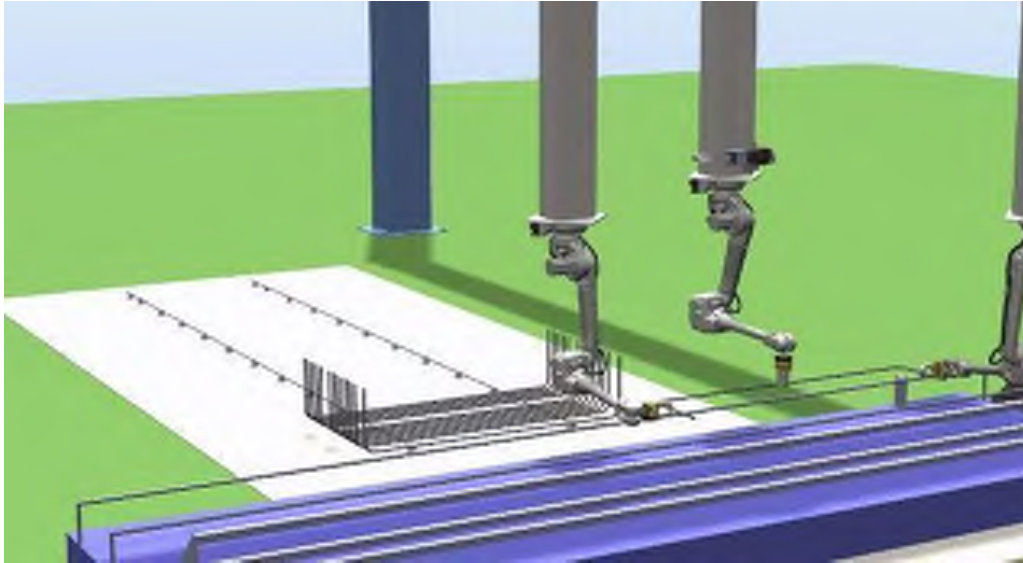
1.1. Bakgrund

Robotdalen är en organisation stationerade i Västerås som är specialiserade på robotlösningar för industri samt vård och omsorg. Robotdalen har fått i uppdrag av Skanska AB att utveckla en automatiserad armeringsstation för tillverkning av armeringskorgar vid brobyggnationer. Detta examensarbete är ett mindre delprojekt i det uppdraget. Den övergripande bilden av den tänkta automatiska armeringsstationen visualiseras i form av enklare CAD-modeller i bilderna 1, 2 och 3. Armeringsstationen är tänkt att bestå av ett robotsystem, en automatisk bockningsmaskin, och en fixtur som tar emot armeringsjärnen från bockningsmaskinen. Armeringsjärnen plockas sedan ur fixturen med hjälp av tre industrirobotar av modell IRB4600 från ABB. Detta examensarbete handlade om att konstruera ovannämnda fixtur.



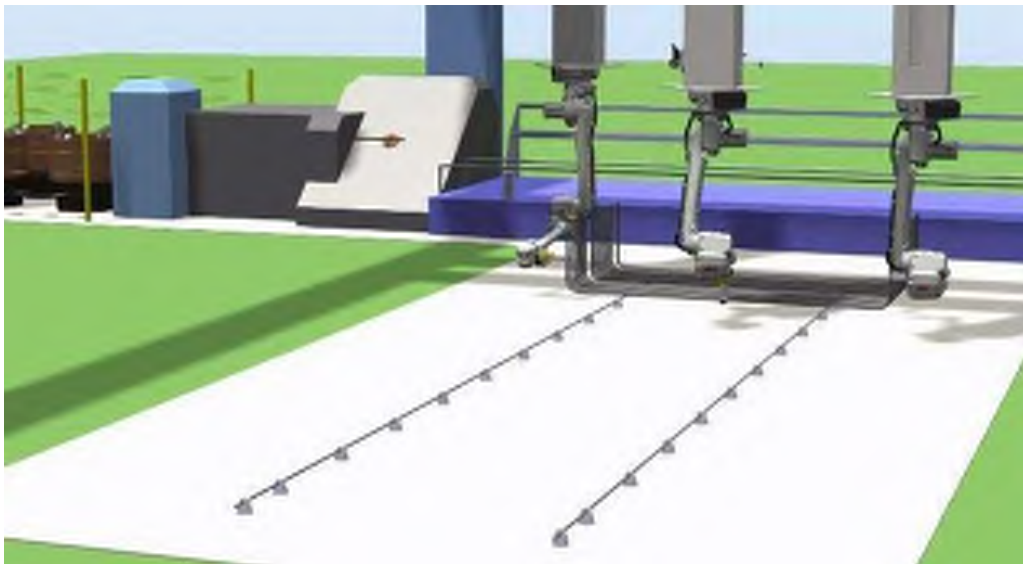
Figur 1- Överblick armeringsstation

Bild 2 visar hur robotsystemet ska vara positionerat då det plockar ett armeringsjärn ur en fixtur. Robotsystemets positionering vid plockning varierar beroende på armeringsjärnets konfiguration och dimensioner. Fixturen som kan ses på bilden är enbart en enklare CAD-modell skapad av Robotdalen för att illustrera var den faktiska fixturen ska vara placerad.



Figur 2- Plockning av armeringsjärn

Bild 3 visar hur robotsystemet monterar ett armeringsjärn i en armeringskorg.



Figur 3- Placering av armeringsjärn

1.2. Problemformulering

För att en robot ska kunna lokalisera ett armeringsjärn måste armeringsjärnets position vara känd. När armeringsjärn matas ut från en bockmaskin och ned på en ställning varierar armeringsjärnens orientering, vilket innebär att roboten inte kan lokalisera armeringsjärnen på ett tillfredställande vis. I en brokonstruktion krävs flera olika bockningskonfigurationer vilket innebär att en fixtur måste vara flexibel nog att hantera denna variation. För att roboten ska kunna gripa om ett armeringsjärn krävs även ett visst utrymme runt robotens grepppunkter på armeringsjärnet.

1.3. Syfte och frågeställningar

Syftet med projektet var att ta fram ett koncept på en fixtur för armeringsjärn samt att skapa en fungerande prototyp och kompletta ritningsunderlag.

Dessa frågor behandlades i projektet:

F1: Hur bör en fixtur konstrueras för att fixera ett armeringsjärn som levererats från en automatisk bockmaskin?

F2: Hur bör en fixtur konstrueras för att möjliggöra greppåtkomst för en industrirobot?

1.4. Avgränsningar

I detta arbete gjordes ett antal avgränsningar. En möjlighet som inte undersöktes var att konstruera en ny bockmaskin eller anpassa en befintlig sådan för att robotsystemet skulle kunna plocka armeringsjärn direkt från den. I arbetet gjordes inte heller någon djupgående undersökning av eventuella elektroniska system som de framtagna koncepten krävde. Den fysiska prototypen av det slutliga konceptet konstruerades ej i fullstor skala, eller i samma material som det slutliga konceptet. Detta eftersom prototypen skulle användas under en presentation tillsammans med ett nedskalat robotsystem och en nedskalad armeringskonstruktion. I arbetet antogs det att armeringsjärnen hade släta ytor utan ojämnheter. Vid användningen av FEM för utfördes endast grundläggande analyser.

Projektet hade omfattningen 15hp och utfördes på Mälardalens Högskola våren 2016.

2. ANSATS OCH METOD

I följande avsnitt beskrivs den ansats och metod som användes under projektet.

Ullmans produktutvecklingsprocess består av sex olika moment som bör följas linjärt. I många fall kan man behöva gå tillbaka och ändra i tidigare poster för att kunna driva projektet framåt. Genom att följa dessa steg säkerställs en strukturerad process och därav ökar sannolikheten för en väl genomtänkt produkt. Metoden kan appliceras på alla typer av produktutvecklingsprojekt. De sex momenten kan ses i figuren nedan.



Figur 4- Ullmans produktutvecklingsprocess

2.1. Produktupptäckt

I första momentet gäller det att hitta möjliga produkter att utveckla. Generellt finns det tre typer av produktutvecklingsprojekt: kunddrivet, teknologidrivet och vidareutveckling av befintlig produkt. Vid kunddrivet projekt finns det ett behov från marknaden som behöver täckas. Teknologidrivet projekt innebär att en ny teknologi möjliggör utveckling av nya produkter. Det är en god idé att ta fram så många alternativ som möjligt och utvärdera dessa, för att hitta den lämpligaste produkten att vidareutveckla (Ullman 2010, s 85-86).

2.2. Projektplanering

Vid projektplanering ska en generell projektplan med milstolpar utformas. Planen bör innehålla alla uppgifter som behöver utföras under projektet. I projektplanering ingår även budgetering för projektet. En välformulerad budget är nödvändig för att projektet ska bli så kostnadseffektivt som möjligt och att kostnaderna för projektet inte skenar iväg (Ullman 2010, s 86, 128).

2.2.1. Gantt-schema

Gantt-schema är ett flödesschema som vanligen används vid projektarbeten. De olika uppgifterna som ingår i projektet listas i ett tidsschema och markeras när uppgiften ska påbörjas och när den planeras att vara klar. Milstolpar för projektet kan med fördel läggas in i tidsschemat. Vid slutet av projektet bör man gå tillbaka och utvärdera hur tidsfördelningen har fördelats och ta lärdom inför framtida projekt (Ullman 2010, s 131-132).

Gantt-schema används för att fördelningen av den tillhandahållna tiden skulle ske jämt över projektet. Genom att noga planera projektet elimineras risken att projektet inte skulle hinna bli klart i tid.

2.3. Projektdefinition

I projektdefinitionsfasen formuleras de förutsättningar som krävs för ett lyckat projekt. Det är viktigt att alla involverade i arbetet förstår vilka krav och önskemål som kunden har, så att alla arbetar mot samma mål (Ullman 2010, s 86).

2.3.1. Problemformulering

Vid problemformuleringen gäller det att förstå problemet som behöver lösas. Att förstå problemet är en viktig grund för att utforma en väl genomtänkt produkt. Genom att noga översätta kundernas krav till en väldefinierad problemformulering ökar chansen för en lyckad produkt (Ullman 2010, s 143).

Den information som krävdes för att skapa problemformuleringen samlades in under initeringsstadiet av projektet. Genom diskussioner med personal på Robotdalen samt ansvariga på Skanska gavs en tydligare bild över vilka problem som väntade i projektet.

2.3.2. Observation

Vid observationer bevaka ett händelseförlopp för att få en grundligare förståelse. Genom att observera en t.ex. en operatör kan man se problem som operatören själv inte tänker på. Observationer bör kompletteras med en intervju för att säkerställa att all viktig kunskap har samlats in (Ullman 2010, s 152-154).

Genom att genomföra observationer kunde en djupare förståelse om de problem och utmaningar som var tvunga att lösas under projektet skapas. Informationen användes sedan för att skapa funktionsanalysen och sedermera kravspecifikationen.

2.3.3. Intervju

Intervjuer används för att samla in information från en eller flera personer. Det kan innebära specifik information om ett visst ämne eller för att undersöka den intervjuades åskit om t.ex. en produkt. Intervjuer genomförs vanligen muntligt mellan en eller flera personer (Ullman 2010, s 152).

2.3.4. Funktionsanalys

I funktionsanalysen definieras huvudsyftet med produkten samt vilka funktioner som krävs för att möjliggöra den. Funktionsanalysen bör inte innehålla några förslag på hur funktionerna skall uppnås. Genom att använda funktionsanalys säkerställs att utvecklingsarbetet fokuserar på de viktigaste funktionerna. Produktens huvudfunktion delas upp i delfunktioner och stödfunktioner. Delfunktioner är funktioner som krävs för att huvudfunktionen ska kunna fungera. Stödfunktioner är funktioner som inte är nödvändiga för att uppfylla huvudfunktionen, men som skapar mervärde för kunden (Österlin 2012, s 42-47).

Den primära anledningen till att fuktionanalys användes i projektet var att få en övergripande förståelse över vilka fuktioner koncepten var tvungen bemästra.

Funktionsanalysen används som stöd i skapandet av kravspecifikationen och även vid framtagandet av koncept.

Funktionsanalysen togs fram i samråd med personal på Robotdalen och ansvariga från Skanska.

2.3.5. Kravspecifikation

Kravspecifikationen är en tabell med de krav som måste uppnås för att leverera en produkt som kunden är tillfreds med. I kravspecifikationen omvandlas kundönskemålen till mätbara storheter. De kan formuleras som direkta krav, önskemål eller binära frågor (Ullman 2010, s 169).

Kravspecifikationen fungerade som ett stöd vid konceptgenereringen och konceptutvärderingen. Kravspecifikationen sågs som ett levande dokument, som förändras under projektets gång.

Kriterierna och målvärden togs fram med stöd av funktionsanalysen. För att verifiera att kravspecifikationen var korrekt fick de ansvariga på Robotdalen gå igenom listan, bekräfta den och komma med egna förslag.

2.4. Konceptutveckling

Under konceptutvecklingsfasen tas alternativa lösningar fram baserade på de krav och önskemål som togs fram under projektdefinitionen. För att finna lämpligaste koncept att arbeta vidare med utvärderas de på hur väl de möter produktkraven och kundönskemålen (Ullman 2010, s 87-89).

2.4.1. Konceptgenerering

Ett produktkoncept är en idé som är tillräckligt väl utvecklad för att dess fysiska funktioner, form och underliggande teknik ska kunna utvärderas. Ett produktkoncept visualiseras ofta med hjälp av skisser eller enklare 3D-modeller. I konceptgenereringsfasen är utgångspunkten en uppsättning med produktkrav och kundönskemål. Målet med fasen är att skapa ett flertal koncept som uppfyller dessa krav och önskemål. Dessa koncept jämförs sedan under konceptvalet. För att öka sannolikheten att hitta ett bra koncept är det önskvärt att skapa ett stort antal koncept under konceptgenereringen (Eppinger, Ulrich 2012, s 118).

Koncepten presenterades för handledarna på Robotdalen under pulsmöten. De fick komma med synpunkter samt förslag på hur koncepten skulle kunna förbättras.

2.4.2. Brainstorming

Brainstorming är en metod som används för att söka idéer internt vid konceptgenerering. Målet med brainstorming är att skapa många koncept varför det är viktigt att inte utvärdera eller förkasta idéer då metoden används. Vid användningen av brainstorming är det fördelaktigt att rikta in idégenereringen mot en specifik funktion i taget och inte ett komplett produktkoncept. Brainstorming kan utföras på flera olika sätt, i grupp eller individuellt.

Vid en variant av brainstorming, kallad 6-3-5 metoden, antecknar deltagarna de idéer som uppstår på ett papper som sedan skickas runt bland deltagarna. Denna variant kallas ibland även brainwriting (Ullman 2010, s 190-191).

Brainstorming, både i grupp och individuellt, användes för att kunna generera ett större antal koncept.

2.4.3. Pughs metod

Pughs metod är en metod för att jämföra och utvärdera olika koncept. Syftet är att poängsätta hur väl de olika koncepten uppfyller en uppsättning kriterier i förhållande till varandra. Denna jämförelse ger underlag för att göra ett informerat val av vilka koncept som är bäst och som bör utvecklas vidare.

Kriterierna som används under utvärderingen är normalt en blandning av produktkrav och kundönskemål. För att ta hänsyn till vilka kriterier som är mest kritiska kan de viktas gentemot varandra.

Under utvärderingen jämförs samtliga koncept med ett referenskoncept. Om ett koncept uppfyller ett kriterium bättre sämre eller lika bra som referensen markeras detta med ett ”plus”, ett ”minus” respektive en nolla.

Efter att alla koncept undersökts för samtliga kriterier summeras antalet ”plus” ”minus” och nollor som varje koncept erhållit. En nettosumma beräknas också där ett ”plus” representeras av 1 och ett ”minus” av -1. Om kriterierna har viktats beräknas även en viktad summa där den viktade siffran multipliceras med 1 -1 eller 0 för varje kriterium och koncept.

För att jämförelsen ska bli meningsfull är det viktigt att de koncept som jämförs är utvecklade till samma nivå. Metoden är iterativ och kan med fördel upprepas flera gånger under processen för att välja koncept.

Resultatet av utvärderingen med hjälp av Pughs metod ska enbart ses som en vägledning i konceptvalet och inte som ett absolut svar (Ullman 2010, s 222-225).

För att verifiera att utvärderingskriterierna och viktningsgraden var korrekt fick ansvariga på Robotdalen gå igenom listan och bekräfta den samt komma med egna synpunkter och förslag.

2.5. Produktutveckling

I produktutvecklingsfasen omvandlas de valda koncepten till verkliga produkter. Koncepten genomgår diverse verktyg för att anpassa dem inför produktion. Vid slutet av produktutvecklingsfasen ska produkten kunna lämnas vidare för tillverkning (Ullman 2010, s 90-91).

2.5.1. CAD

CAD (Computer Aided Design) är ett arbetssätt där datorer används i konstruktions- och ritningsarbete. CAD-programvaror används både för att skapa tvådimensionella ritningar och tredimensionella modeller. Tredimensionella

CAD-modeller kan även användas för att genomföra beräkningar på olika komponenter, till exempel hållfasthetsberäkningar med hjälp av FEM (Finita Element Metoden). Tredimensionella modeller kan även användas som tillverkningsunderlag vid tillverkning med till exempel friformningsmaskiner (Pärletun, 2016).

CAD användes i stor utsträckning under projektet för att enkelt kunna visualisera tänkta koncept. CAD-modeller gjorde det lättare att förkara de tänkta koncepten för handledare och personal på Skanska.

2.5.2. Finita ElementMetoden

Finita elementmetoden (FEM) är en numerisk metod för att lösa partiella differentialekvationer. I metoden delas ett kontinuerligt problem upp i ett ändligt antal element. Problemet löses sedan separat för varje element.

Vid beräkningar på mekaniska konstruktioner beräknas först sambandet mellan kraft och förskjutning ut för varje element i konstruktionen.

Utifrån detta skapas sedan en modell över hela konstruktionen genom att fastställa jämviktslägen vid varje nod i modellen. Vid konstruktionsarbete utförs FEM-analyser med hjälp av datorer (Zienkiewicz, Taylor och Zhu 2005, s 1-3).

Även om endast basala FEM-analyser användes i projektet gav de tillräcklig information för att konstatera att delarna skulle tåla den påfrestning som de skulle utsättas för.

2.5.3. DFMain

DFMain (Design For Maintenance) är en metod som kan användas under produktutvecklingsarbetet för att underlätta underhåll av den slutgiltiga produkten. För att implementera DFMain finns ett antal riktlinjer, dessa riktlinjer kan delas upp i tre kategorier: Riktlinjer för att förenkla underhåll av produkten, riktlinjer för att förbättra produktens tillförlitlighet och riktlinjer för att öka möjligheten att underhålla produkten (Mulder et al. 2013).

Syftet med att använda DFMain i projektet var för att skapa mer lätt underhållen produkt. Produkten kan komma att användas på svårtillgängliga platser, där det är svårt att få dit specialister vid oplanerade driftstop. Därav är det viktigt att den ordinarie personalen kan underhålla produkten i så stor utsträckning som möjligt.

2.5.4. FMEA

Failure Modes and Effects Analysis är ett systematiskt tillvägagångssätt för att identifiera och diagnostisera eventuella risker. Produkten går igenom grundligt och man utreder vad det skulle innebära om en funktion skulle sluta fungera eller fungera bristfälligt. Sedan bedömer man hur allvarligt ett fel skulle vara samt sannolikheten att felet skulle uppkomma. Fel med stor felfrekvens eller allvarlighetsgrad behöver åtgärdas. Att åtgärda produktfel i efterhand kan vara mycket kostsamt och genom att använda FMEA kan dessa fel hittas och åtgärdas innan produktion (Ullman 2010, s 351-353).

2.6. Produktstöd

Vid produktstödsfasen tas teknisk information fram som ritningsunderlag för framtida produktion. För att möjliggöra framtida underhåll bör även fullständiga monterings- och underhållsanvisningar skapas. Man bör även se över hur produkten ska tas omhand när den inte längre används (Ullman 2010, s 91-92).

2.6.1. Ritningsunderlag

En komplett ritning behöver innehålla all nödvändig information för att kunna tillverka det tänkta objektet. Väldefinierade ritningsunderlag minimerar risken för missförstånd vid produktion. Det är produktutvecklarens ansvar att skapa korrekta ritningar (Ullman 2010, s 366).

3. TEORETISK REFERENSRAM

I detta avsnitt presenteras den teori som arbetet grundats på.

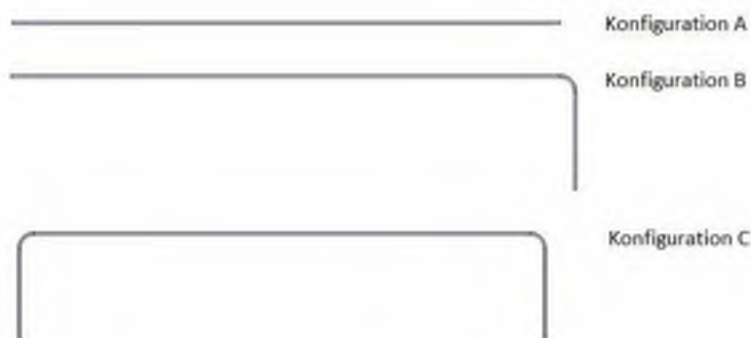
3.1. Armeringsjärn

Armering med stångar används i betongkonstruktioner för att öka hållfastheten. Armeringen medför även att betongkonstruktionens seghet ökas drastiskt. Stålet som används för armering är varmvalsat, seghärdat och har en relativt hög draghållfasthet. Armeringen kan delas in i fem kategorier beroende på användningsområde; dragarmering, tryckarmering, skjuvarmering, sprickarmering samt fördelningsarmering.



Figur 5- Armeringsjärn

I olika situationer används olika bockningskonfigurationer. I figur 3 illustreras konfigurationerna A, B och C. Utöver dessa finns ytterligare ett stort antal konfigurationer. Armeringsjärnen monteras ihop till så kallade armeringskorgar. Hopfogningen sker vanligtvis med svetsning eller najning. Raka armeringsjärn kan även svetsas ihop till en nätkonstruktion.



Figur 6- De tre bockningskonfigurationerna

Det finns flera olika metoder för att förankra armeringsjärn i betong. En vanlig metod är att använda armering med kammar. Kammarna medför att kontaktytan mellan armeringsjärnet och betongen ökar. Kammarna gör också att de drag- och tryckkrafter som belastar armeringsjärnet riktas om. En annan metod som används för att förbättra förankringen av armeringen i betongen är så kallade ändkrokar, där armeringsjärnets ändar bockas till en u-form (BE Group, 2016).



Figur 7- Närbild på kammar

3.2. Industriell robotik

3.2.1. Definition

Enligt Bolmsjö (2006, s 39) är definitionen av begreppet industrirobot enligt ISO-standard:

”Industrirobot eller robot är en automatiskt styrd, omprogrammerbar universell manipulator, som är programmerbar i minst tre axlar och som kan vara antingen fast monterad eller mobil för användning i industriell automatisering”

3.2.2. Användning

Industrirobotar används inom flera olika områden för att automatisera processer inom industrin. Robotarna konstrueras ofta för relativt specifika arbetsuppgifter. Användningen av industrirobotar kan i grova drag delas in i tre kategorier; materialhantering, processoperationer och montering (Bolmsjö 2006, s 49).

Kategorin materialhantering innefattar uppgifter såsom sorterings- och packningsuppgifter. Vid dessa tillämpningar är industriroboten inte direkt involverad i förädlingen av produkten, utan kan istället ses som ett understöd till tillverkningsprocessen. Industrirobotar som utför processoperationer är direkt involverade i förädlingen av produkten. Olika typer av svetsning, vattenskarvning och ytbeläggning är exempel på processoperationer. Vid montering används industrirobotar för att sammansätta detaljer eller delsammanställningar till en komplett produkt (Bolmsjö 2006, s 50-51).

3.2.3. Uppbyggnad

Industriroboten består i regel av tre delsystem som samverkar med varandra. De tre delsystemen är: Åkdonet, armen och handleden (Bolmsjö 2006, s 77).

Åkdonets uppgift är att transportera roboten till dess arbetsposition. Inom verkstadsindustrin kan åkdonet normalt röra sig längs en till tre linjära axlar. Roboten kan också vara fast monterad i en viss position.

Då förs istället objekten som roboten ska interagera med till robotens position. Robotens arm ansvarar för att förflytta handledens position i rummet.

På handleden monteras det verktyg som roboten använder. Handledens uppgift är att positionera verktyget, vilket genomförs med hjälp av minst en roterande axel. (Bolmsjö 2006, s 78-79).

3.2.4. IRB 1200 och IRB 4600

IRB 1200 är en 6-axlig robot från ABB. IRB 1200 finns i två varianter; IRB 1200-7/0.7, som har en maximal räckvidd på 703mm och kan ta en maximal last på 7 kg och IRB 1200-5/0.9 som har en maximal räckvidd på 901mm och kan ta en maximal last på 5kg (ABB Group, 2014).

IRB 4600 är likt IRB 1200 en 6-axlig robot från ABB. IRB4600 finns i fyra varianter. IRB4600 har större räckvidd än IRB1200 (2.05 m för IRB 4600-60/2.05) och kan ta en betydligt större last (60 kg) (ABB Group, 2016).

3.3. Balknedböjning

När en balk belastas uppstår en nedböjning. Balkens nedböjning kan bestämmas med hjälp av den elastiska linjens differentialekvation. Lösningen av ekvationen beror på de aktuella randvillkoren för balkens ändar. Den elastiska linjens differentialekvation formuleras:

$$(EI(x)w''(x))'' = q(x)$$

Där E är materialets elasticitetsmodul, I är balkens yttröghetsmoment, w är nedböjningen och q är den pålagda lasten (Dahlberg 2012, s 189). Om balken är jämnstyv, det vill säga om produkten EI är konstant kan ekvationen skrivas om som:

$$EIw^{IV}(x) = q(x)$$

För ett antal elementarfall vid balkböjning med vanliga randvillkor och laster har lösningar av linjära linjens differentialekvation tagits fram. Dessa finns ofta tillgängliga i konstruktionshandböcker (Dahlberg 2012, s 196).

4. GENOMFÖRANDE

I följande avsnitt beskrivs hur genomförandet av projektet utfördes.

4.1. Produktupptäckt

Detta moment ingick ej i projektet då Skanska AB tillsammans med Robotdalen gjort produktupptäckten innan projektet startat.

4.2. Projektplanering

Vid projektplaneringen utformades en preliminär tidsplan för projektet.

4.2.1. Gantt-schema

För att få en jämn tidfördelning för de uppgifter som behövde bli färdigställda under projektet upprättades ett Gantt-schema. Uppgifterna tillsammans med en preliminär tidsram fördes in i schemat. I schemat markerades även alla deadlines ut samt egna milstolpar. Gantt-schemat användes kontinuerligt under projektet för att kontrollera att det låg i fas. För fullständigt Gantt-schema se bilaga 1.

4.3. Projektdefinition

Under projektdefinitionen söktes en djupare förståelse om projektet. Vid besök på Skanskas fabrik i Bollebygd granskades hur hanteringen av armeringsjärn fungerade. I funktionsanalysen listades de funktioner som fixturen behöver klara av för att fungera tillfredsställande. Informationen från funktionsanalysen användes sedan för att skapa en kravspecifikation.

4.3.1. Intervju

Intervjuer med handledare och ansvariga på Skanska utfördes i sammanhan med förbokade möten. Varannan vecka träffades samtliga examensjobbare som var inkluderade i projektet, på pulsmöten tillsammans med handledare från Robotdalen. Detta för att stämma av hur det gick med projektet, diskuterade eventuella problem och svara på frågor som hade uppkommit sedan föregående möte. Vid frågor som behövdes besvars omgående sköttes korespondansen via mailkontakt med handledare på Robotdalen.

4.3.2. Problemformulering/Observation

För att få insikt i hur armeringsjärn hanteras idag genomfördes ett studiebesök på Skanska Stomsystem AB i Bollebygd. På fabriken i Bollebygd tillverkas främst armerade betongpålar. Under studiebesöket studerades bland annat en riktningsmaskin från Progress och den tillhörande materialhanteringen.

Armeringsjärnen levererades i form av rullar som sedan skickades in i riktningsmaskinen. Från riktningsmaskinen transporterades sedan järnen vidare med hjälp av en transportör för att därefter monteras till armeringskorgar.



Figur 8- Armeringsrullar



Figur 9- Riktningmaskin

4.3.3. Funktionsanalys

För att få en tydligare bild över vilka funktioner som behövde uppfyllas av fixturen, skapades ett funktionsträd. Funktionsträdet utgick från huvudfunktionen som sedan delades upp i mindre delfunktioner. Som huvudfunktion för fixturen valdes ”länk mellan bockmaskin och robot”. Huvudfunktionen bröts sedan ner i två större delfunktioner: ”interagera med bockmaskin” och ”möjliggöra robothantering”.

För att fixturen skulle kunna interagera med bockmaskinen krävdes att fixturen alltid skulle vara korrekt positionerad. Det kunde säkerställas genom att möjliggöra kalibrering av fixturen i x-, y- samt z-led.

För att möjliggöra robothantering krävdes tillräckligt med utrymme kring greppunkten, att armeringsjärnet var korrekt positionerat samt att nedböjningen av armeringsjärnet inte var för stort vid greppunkten.

Som stödfunktion valdes ”portabel”. Fixturen skulle fraktas mellan flera olika byggarbetsplatser och således skulle extra mobilitet skapa ett mervärde för kunden.

För fullständigt funktionsträd se bilaga 2.

4.3.4. Kravspecifikation

I kravspecifikationen dokumenterades de krav som ställdes på fixturen. Kravspecifikationen fungerade som ett levande dokument som förändrades under projektets gång. Fixturen utvecklades parallellt med det robotverktyg som skulle interagera med fixturen. Detta medförde att kraven kunde förändras när verktyget förändrades.

Minimalt fritt område kring grepppunkterna var från början en kubisk volym med sidorna 100mm. Det måttet ändrades under projektets gång. Måttet baserades på den volym som robotverktyget krävde för att komma åt armeringsjärnet.

Att den erforderliga greppytan ökade resulterade i att vissa koncept inte längre skulle generera tillräcklig åtkomst, vilket ledde till att vissa koncept blev tvungna att omkonstrueras eller avvecklas.

De största och minsta tillåtna armeringslängderna baserades på de armeringsjärn som fixturen skulle kunna hantera. Maximalt tillåten armeringstyngd kom av vikten på det tyngsta armeringsjärnet.

Hela den automatiserade robotstationen skulle vara placerad i en torr arbetsmiljö. Likväl valdes att sätta som krav att fixturen i största möjliga mån skulle tåla väta, detta på grund av att en helt fuktfri miljö inte kunde garanteras vid transport.

Det maximala måttet på fixturen baserades på storleken på lastbilsflak, för att underlätta vid transporter av fixturen.

För fullständig kravspecifikation se nedan.

Tabell 1- Kravspecifikation

Nr	Krav	Riktvärde	Kommentar
1	Maximal tillåten armeringstyngd:	46kg	Beror på armeringsdiameter/längd
2	Maximal tillåten armeringslängd:	12m	Beror av det längsta järnet
3	Minimal tillåten armeringslängd:	0,9m	Beror av det kortaste järnet
4	Maximal tillåten armeringshöjd	3m	Beror av det kortaste järnet
5	Maximal diameter armeringsjärn:	25 mm	
6	Minimal diameter armeringsjärn:	12 mm	
7	Klara bockningskonfiguration A, B & C	Ja	
8	Antal grepppunkter	3st	
9	Maximal nedböjning grepppunkt:	1 mm	
10	Minimalt fritt område kring grepppunkter	100mm	Beror av storlek på robotverktyg
11	Antal typer av bockningar:	3st	A, B, C samt specialjärn
12	Tid för att ställa om:	<30 s	Beror på tid för

			robot/böckningsmaskin
13	Antal delar:	<	Inga restriktioner
14	Maxvikt:	500 kg	
15	Portabel:	Ja	
16	Längd:	<16 m	Beror på lastutrymme/lastbilsflak
17	Bredd:	<2.5 m	Beror på lastutrymme/lastbilsflak
18	Flexibel höjd:	Ja	
19	Tåla väta	IP02	
20	Tåla värme	40 °C	
21	Tåla kyla	– 30 °C	



4.4. Konceptutveckling

Vid konceptgenereringen användes brainstorming som metod både gemensamt och individuellt. Koncepten utvärderades sedan med hjälp av Pughs metod.

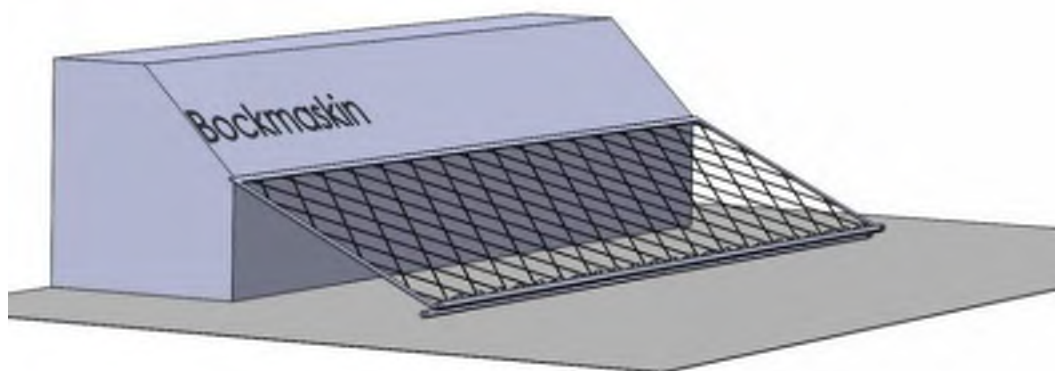
4.4.1. Konceptgenerering

Under konceptgenereringsfasen utgick arbetet från den funktionsanalys och kravspecifikation som sammanställts tidigare i projektet. För att generera så många olika idéer som möjligt användes brainstorming. Brainstorming genomfördes först individuellt där båda gruppmedlemmarna antecknade koncept och idéer med papper och penna. Därefter skedde en gemensam brainstorming där de individuella idéerna diskuterades och delösningar kombinerades till nya koncept. Denna procedur upprepades under konceptgenereringsfasen. För att få nya infallsvinklar under konceptgenereringen involverades även Jonas Persson vid brainstormingen. Jonas genomförde ett annat delprojekt i arbetet med att skapa en automatisk armeringsstation. Ett urval av de skisser som togs fram under brainstormingen återfinns i bilaga 3.

Konceptgenereringen ledde fram till fem koncept som sedan utvärderades. Dessa koncept visualiseras nedan i form av enklare CAD-modeller.

Koncept 1 – Nät och rullar

Koncept 1 bestod av en ram med ett stålnät som armeringsjärnen skulle glida ner på från böckmaskinen. Järnet skulle sedan transporteras till sidan av fixturen med hjälp av ett transportörsystem som satt monterat i nederkant av fixturen. Därefter skulle roboten gå in och plocka armeringsjärnet.



Figur 10- Koncept 1

Koncept 2 – Stag och rullar

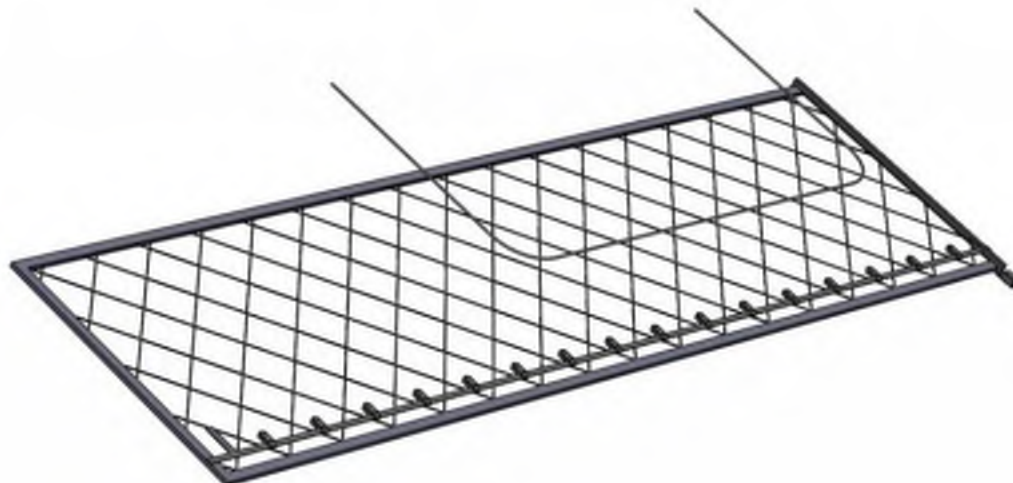
Koncept 2 byggde på samma princip som koncept 1 (ovan). Skillnaden mellan koncept 1 och 2 var att nätet i koncept 1 bytts ut mot tvärgående ribbor. Detta medförde att robotsystemet fick mer grepputrymme när det skulle plocka järnet från fixturen.



Figur 11- Koncept 2

Koncept 3 – Nät och skiva

Koncept 3 bestod, likt koncept 1 (ovan) av en ram med ett stålnät som armeringsjärnet skulle glida ner på. Skillnaden mellan koncept 1 och 3 var att transportörsystemet i koncept 1 bytts mot en motordriven skena som skulle föra järnet till rätt position för plockning av robotsystemet.



Figur 12- Koncept 3

Koncept 4 – XY-system

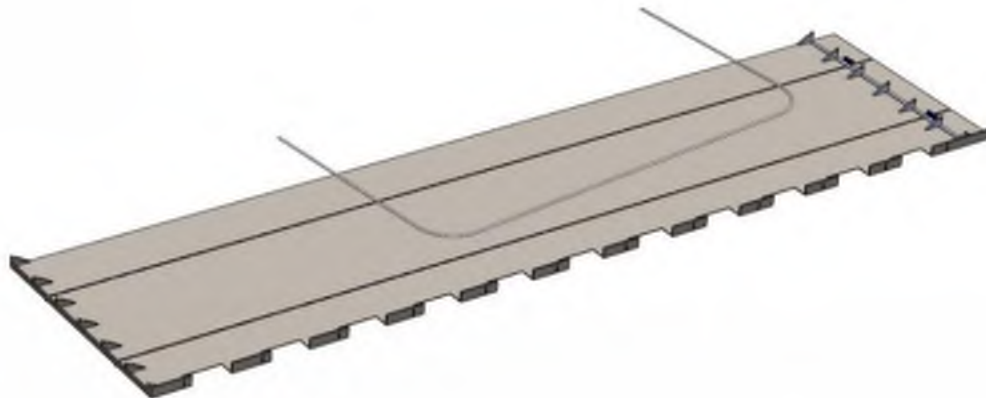
Koncept 4 bestod av en ram med motordrivna stödskenor. Stödskenorna skulle styras till den position där bockmaskinen skulle släppa armeringsjärnet. Armeringsjärnet skulle sedan glida ned på skenorna. Skenorna skulle därefter styras till en känd position där robotsystemet skulle kunna plocka järnet. Till skillnad från övriga koncept skulle koncept 4 stå plant på marken och två motordrivna gummiband, monterade på två av skenorna, skulle istället dra ned armeringsjärnet till korrekt position. För att konceptet skulle kunna hantera B- och C-järn försågs de yttersta stödskenorna med konsoler monterade vinkelrätt mot stödskenornas längsriktning.



Figur 13- Koncept 4

Koncept 5 – Kam

Koncept 5 bestod av en kam som skulle löpa över en skiva med hjälp av motorer. Armeringsjärnet skulle glida ned på skivan från bockmaskinen och sedan skjutas till sidan av fixturen och lyftas upp av kammen.



Figur 14- Koncept 5

4.4.2. Konceptval

För att utvärdera koncepten användes Pughs metod. En lista med viktade krav sammanställdes baserade på kravspecifikationen samt egna uppfattningar. Listan presenterades för personal på Robotdalen som granskade kraven och kom med egna förslag. De fem valda koncepten utvärderades sedan efter hur väl de skulle uppfylla kraven. Koncept 1 valdes som referenskoncept. Utvärderingen visade att koncept 1, 2 och 3 mötte de förbestämda kraven bäst, och därmed borde vidareutvecklas.

Efter ändrade förutsättningar på greppåtkomsten behövde koncepten utvärderas om. Då åtkomstkraven inte uppfylldes på koncept 1, 2 och 3 förkastades dessa. Istället vidareutvecklades koncept 4 och 5. Även koncept 5 visade viss problematik med greppåtkomst. Efter konsultation med Robotdalen vidareutvecklades endast koncept 4 trots dess låga resultat i den första utvärderingen.

4.5. Produktutveckling

Under produktutvecklingsfasen utvecklades konceptet till en slutlig produkt. Konceptet utvärderades sedan med hjälp av FMEA och DFMain.

4.5.1. DFMain

För att utvärdera hur underhållsvänlig det slutgiltiga konceptet var utfördes en DFMain. Konceptet granskades noga för att fastställa vad som borde åtgärdas för att förenkla underhållet, förlänga tillförlitligheten samt öka möjligheten att underhålla systemet. Beroende av om kriterierna uppfylldes eller inte fick de antingen anmärkningen *ingen åtgärd* eller förslag på hur dessa kunde åtgärdas vid vidare arbete. Om riktlinjerna inte gick att applicera på projektet lämnades de med kommentaren *inte applicerbart*.

De riktlinjer som ansågs behöva ses över vid vidare arbete tas upp i avsnitt 7. För fullständig DFMain se bilaga 8, 9, och 10.

4.5.2. FMEA

En fullständig FMEA utfördes på det slutliga konceptet för att påvisa eventuella fel och brister på konstruktionen, samt ge förslag på hur dessa brister kunde åtgärdas. Det utfördes en FMEA för varje delsammanställning. De flesta fel och brister som konstaterades åtgärdades direkt. Att titta på lämpligaste rostskyddsbehandling samt att skapa monterings- och underhållsinstruktioner lämnades för vidare arbete. Ett annat problem som ansågs behöva ses över var att försöka få ner friktionen mellan armeringsjärnen och stödskenorna samt mellan armeringsjärnen och konsolerna. För fullständig FMEA se bilaga 5, 6 och 7.

4.6. Komponentval

Valet av komponenter grundades på analyser med FEM, nedböjningsberäkningar samt belastningskrav på komponenterna.

Fixturen kan delas upp i tre mindre delsammanställningar: ram, vagn med stödskenor och vagn med kedjetransportör. Antal vagnar med stödskenor baserades på att den maximala tillåtna nedböjningen av järnen mellan greppunkterna inte fick överskrida 10mm. Maximala nedböjningen vid greppunkterna fick inte överskrida 1mm. Fixturen var tänkt att på förhand veta var roboten kom att greppa armeringsjärnet, således kunde en vagn med stödskena placeras i anslutning till den punkten för att minimera nedböjningen.

Det tyngsta armeringsjärnet som skulle vila i fixturen var ett 12 meter långt armeringsjärn med diametern 25mm och en vikt på 46kg. När det tyngsta armeringsjärnet vilade i fixturen så fördelades de 46kg jämt över de två kedjetransportörerna samt de fyra stödskenorna med en sjättedel av armeringsvikten per stödpunkt. I beräkningarna användes en säkerhetsfaktor på 1,5.

Tabell 2- Beräkningsdata

Tyngsta armeringsjärn	46kg
Maxbelastning/stödpunkt	7,67kg
Längd ram	12,2m
Bredd ram	3,2m
Säkerhetsfaktor S_f	1,5

Vagn med kedjetransportör

Denna konstruktion bestod av en kedjetransportör som var monterad på två vagnar med vardera två flänshjul. Den ena vagnen hade motor och växellåda monterad på ett av flänshjulen för att möjliggöra förflyttning i sidled.

Kedjetransportör

Kedjetransportörerna bestod av ett 3,2 meter långt VKR-rör. Över och inuti röret löpte en transportkedja vars uppgift var att transportera armeringsjärnet från utgångsposition till korrekt position. Drivningen av transportkedjan sköttes av en

motor med växellåda som var monterad på ett motorfäste i ena ändan av röret. I andra ändan satt ett nylonhjul som kedjan löpte över när det bytte riktning. På och inuti röret satt glidlager monterade för att minska friktionen mellan kedja och underlag. Glidlagret hjälpte även till att hålla kedjan i rätt position. På sidan av kedjetransportören satt sex konsoler monterade vars uppgift var att stödja upp och möjliggöra greppåtkomst för armeringsjärn av typ B och C.

Transportkedja

Som transportkedja valdes C2040HP från Iwis. Kedjan hade en brottspänning på minst 11,0KN och en vikt på 0,46kg/m.

Tabell 3- Information transportkedja

Delning	25,40mm
Brottsänning	11,0KN
Vikt per meter	0,46kg/m

Kedjedrev

Som drev valdes Chain wheel ISO 606 – 11 Z 16A-1 med en kuggdelning på 25,44mm vilket löpte bra med kedjans delning på 25,40mm.

Tabell 4- Information drev

Antal kuggar	11st
Delning	25,44mm

Drevets delningsdiameter gavs av

$$\text{Delningsdiameter} = \text{Antal kuggar} * \frac{\text{Delning}}{\pi}$$

$$d = 11 * \frac{25,44}{\pi}$$

$$d = 89,07\text{mm}$$

Motor Kedjedrift

Det erforderliga vridmomentet som motorn krävde, baserades på den friktionskraft som verkade i motsatt riktning när armeringsjärn drogs från utgångsposition till korrekt position samt delningsdiameteren på kedjedrevet. Friktionskraften uppstod mellan armeringsjärnet och stödskenorna. Som statisk friktionskoefficient användes $\mu_s = 0,3$. Den maximala friktionskraften uppkom när det största armeringsjärnet transporteras i fixturen.

Nödvändigt vridmoment gavs av:

$$M = m * g * \mu_s * \frac{\text{delningsdiameter}_{drev}}{2}$$

$$M = 46 * 9,82 * 0,3 * \frac{89,07}{2}$$

$$M = 6035,611\text{Nmm} = 6,04\text{Nm}$$

Det erforderliga vridmomentet fördelades över två kedjetransportörer, därav blev vridmomentet per motor 3,02Nm.

Servomotor EMME-AS-60-S-LS-ASB tillsammans med planetväxel EMGA-60-P-G5-EAS-60 med en utväxling på 5:1 gav ett nominellt vridmoment på 3,0 Nm och ett maximalt vridmoment på 14Nm.

Konsoler

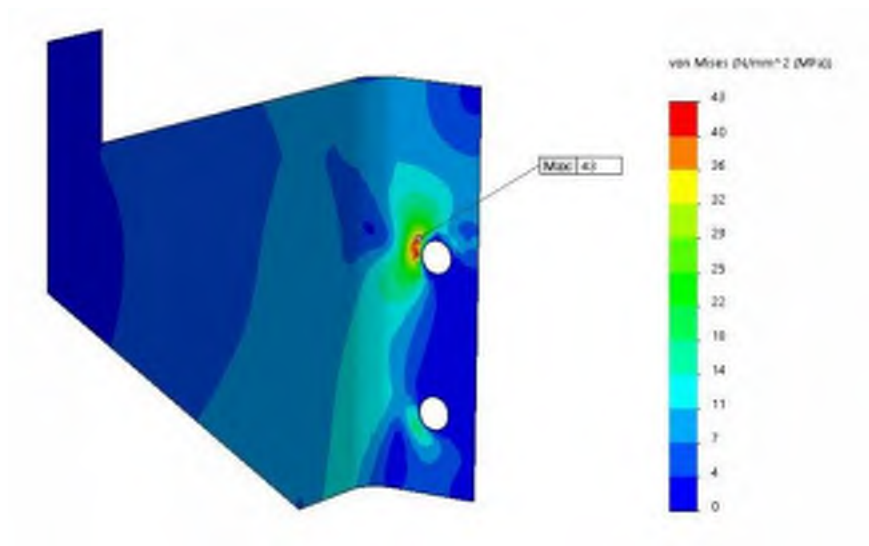
För att dimensionera konsolernas godstjocklek användes FEM-analys. Vikten som konsolerna belastades med var tyngden av kortsidan på ett B- eller C-järn. Som längst kunde en kortsida vara 3 meter vilket gav en maximal vikt på 11,5kg för ett armeringsjärn med diametern 25mm. Vikten fördelades lika över de sex konsolerna. Konsolerna utsattes även för en friktionskraft när järnen drogs över dem.

I analysen fixerades konsolen i skruvhålen, varpå en kraft motsvarande den maximala armeringstyngden samt friktionskraften applicerades i den punkt där järnet kom att vila på konsolen. I analysen användes skal-mesh med global storlek på 2mm med en tolerans på 0,1mm.



Figur 15- FEM-analys konsol

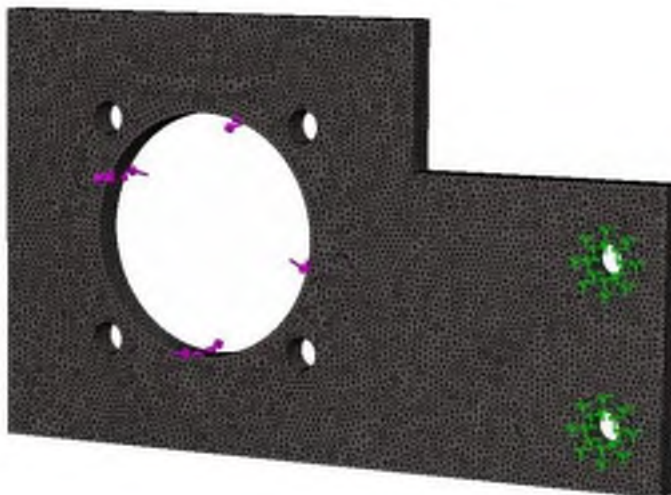
Med en normalkraft på 18,82N, friktionskraft på 5,46N och en godstjocklek på 2mm uppkom en spänning på 43MPa, vilket låg under sträckgränsen för materialet med en säkerhetsfaktor större än 1,5.



Figur 16- Spänningsuppkomst vid FEM-analys av konsol

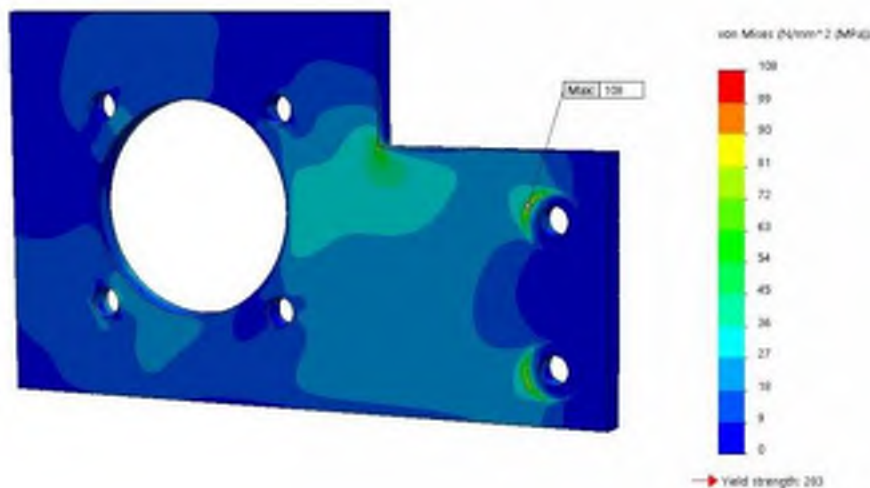
Motorfäste

För att dimensionera motorfästets godstjocklek användes FEM-analys. I analysen fixerades skruvhålen samtidigt som två moment applicerades på motorfästet. Ett böjande moment motsvarande motorn och växellådans tyngd samt ett moment motsvarande motorns maximala vridmoment på 14Nm. I analysen användes standard MESH med global storlek i på 3mm med en tolerans på 0,3mm. MESH control med elementstorlek på 1mm applicerades på insidan av skruvhålen, i motorinfästningen samt kanterna.



Figur 17- FEM-analys av motorfäste

Med en godstjocklek på 5mm uppkom en spänning på 108MPa vilket låg under sträckgränsen för materialet med en säkerhetsfaktor större än 1,5.



Figur 18- Spänningsuppkomst vid FEM-analys av motorfäste

Glidlager

Som material till glidskenorna valdes nylon, då inga andra krav än låg friktion ställdes på materialet.

Kedjehjul

Hjulet som kedjan löpte över när det bytte riktning dimensionerades till 80mm för att kedjan skulle löpa bra. För att erhålla en låg friktion mellan kedja och hjul valdes nylonhjul typ 82 från Lyftab. Hjulfästet bestod av böckad plåt med godstjocklek 2mm.

Stopp

Stoppet var konstruerad av plåt med godstjocklek på 2mm. Stoppet var tänkt att bytas ut mot en trycksensor. Att undersöka och välja lämpligaste typ av sensor lämnades till vidare arbete.

VKR-rör

Valet av VKR-rör baserades på den maximalt tillåtna nedböjningen på 1mm samt att röret behövde vara minst 100mm högt för att robotverktyget skulle kunna komma i mellan ram och armeringsjärn. Nedböjningen uppkom av den maximala belastningen samt nedböjningen på grund av rörets egenvikt.

Den maximala belastningen uppstod när det tyngsta järnet befann sig mitt på kedjetransportören. I beräkningen sågs röret som fritt upplagd. För att hitta den optimala rörprofilen söktes först den profil som hade ett tillräckligt yttröghetsmoment för att klara punktlasten. Därefter kontrollerades så att det valda rörets nedböjning på grund av punktblastningen samt egenvikten inte överskred den tillåtna nedböjningen. Sist kontrolleras så att den uppkomna böjspänningen i röret inte överskred materialets böjsträckgräns.

Tabell 5- Beräkningsdata vid dimensionering av VKR-rör

Last [m]	7,67kg
Säkerhetsfaktor [S_f]	1,5
Längd [L]	3200 mm
E-modul [E]	210 000MPa
Tyngdacceleration [g]	9,82N/kg
Sträckgräns böjning [Re_b]	260MPa
Material	SS 141312-00

Profil med tillräckligt yttröghetsmoment för att klara punktbelastningen
 Erforderligt tröghetsmoment gavs av:

$$\delta_{tillåten} = \frac{m \cdot g \cdot S_f \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I_x}$$

$$\delta_{tillåten} = 1 \text{ mm}$$

$$1 \text{ mm} = \frac{7,67 \cdot 9,82 \cdot 1,5 \cdot 3200^3}{48 \cdot 210\,000 \text{ MPa} \cdot I_x}$$

$$I_x = \frac{7,67 \cdot 9,82 \cdot 1,5 \cdot 3200^3}{48 \cdot 210\,000 \cdot 1}$$

$$I_x = 367\,271 \text{ mm}^4$$

VKR-rör 100x50x3,2 med $I_x = 1\,170\,000 \text{ mm}^4$ valdes.

Nedböjning med utbredd last för VKR 100x50x3,2

VKR-röret vägde 7,18 kg/m. Röret var 3,2 meter vilket gav en totalvikt på $Q=22,976\text{kg}$. I den utbredda lasten räknas även vikten av transportkedjan med. Vikten av glidlager och konsoler försumrades i beräkningen på grund av att deras låga vikt. Transportkedjans vikt var 2,944kg

Nedböjning på grund av utbredd last gavs av:

$$\delta_{utbredd} = \frac{5 \cdot Q \cdot g \cdot S_f \cdot L^3}{384 \cdot E \cdot I_x}$$

$$\delta_{utbredd} = \frac{5 \cdot (22,976 + 2,944) \cdot 9,82 \cdot 1,5 \cdot 3200^3}{384 \cdot 210\,000 \cdot 1\,170\,000}$$

$$\delta_{utbredd} = 0,66 \text{ mm}$$

Nedböjning på grund av punktlast för VKR 100x50x3,2

Nedböjning för punktlast gavs av

$$\delta_{punktlast} = \frac{m \cdot g \cdot S_f \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I}$$

$$\delta_{punktlast} = \frac{7,67 \cdot 9,82 \cdot 1,5 \cdot 3200^3}{48 \cdot 210\,000 \cdot 1\,170\,000}$$

$$\delta_{punktlast} = 0,31 \text{ mm}$$

Total nedböjning gavs av:

$$\delta_{total} = \delta_{utbredd} + \delta_{punktlast} = 0,66 \text{ mm} + 0,31 \text{ mm}$$

$$\delta_{total} = 0,97 \text{ mm}$$

Då den totala nedböjningen inte överskred den tillåtna nedböjningen, valdes VRK-rör 100x50x3,2.

Kontroll av böjspänning för VKR 100x50x3,2

Böjmotståndet W_x för VKR 100x50x3,2 var 23500mm^3

Uppkommen böjspänning gavs av:

$$\begin{aligned}\sigma_b &= \frac{|M_{\max}|}{W_x} \\ M_{\max} &= M_{\text{utbredd}} + M_{\text{punktlast}} \\ M_{\text{utbredd}} &= -\frac{S_f \cdot Q \cdot g \cdot L}{8} \\ M_{\text{punktlast}} &= -\frac{S_f \cdot m \cdot g \cdot L}{4} \\ M_{\max} &= -\frac{1,5 \cdot (22,976 + 2,944) \cdot 9,82 \cdot 3200}{8} - \frac{1,5 \cdot 7,67 \cdot 9,82 \cdot 3200}{4} \\ M_{\max} &= -243\,103\text{Nm} \\ \sigma_b &= \frac{|-243\,103|}{23\,500} \\ \sigma_b &= 10,34\text{MPa}\end{aligned}$$

Beräknad σ_b överskred inte tillåten Re_b

Hjul

Den högsta belastningen som hjulen utsattes för uppkom då det tyngsta armeringsjärnet befann sig i fixturen, då bar de fyra flänshjulen upp vikten av kejejettransportören samt vikten av armeringsjärnet.

Totala belastningen gavs av:

$$\begin{aligned}m_{\max} &= m_{\text{kejejettransportör}} + m_{\text{armering}} \\ m_{\max} &= 30,73 + 7,67 \\ m_{\max} &= 38,4\text{kg}\end{aligned}$$

Belastning per flänshjul gavs av:

$$\begin{aligned}m_{\max}/\text{flänshjul} &= \frac{m_{\max}}{4} \\ m_{\max}/\text{flänshjul} &= \frac{38,4}{4} \\ m_{\max}/\text{flänshjul} &= 9,6\text{kg}\end{aligned}$$

Flänshjul från Lyftab med en diameter på 70mm och tillåten belastning på 125 kg/hjul valdes.

Motordrift

De moment som drivmotorn var tvungen att klara av uppkom av hjulens rullmotstånd mot ramen samt den friktionskraft som uppkom när fixturen ”klämde ihop” för att positionera järnet. Rullmotståndet för flänshjulen var svår att estimeras, den uppskattades till $\mu_r < 0,01$.

Då maximala belastningen på flänshjulen var 9,6kg skulle det uppkomma vridmomentet på grund av rullmotståndet bli försvinnande litet i jämförelse med det moment som uppkom på grund av friktionsmotståndet. Således försumrades rullmotståndet i beräkningen.

Erforderligt vridmoment gavs av:

$$M = F_N * \mu_s * r_{hj\ddot{u}l}$$

$$r_{hj\ddot{u}l} = \frac{70}{2} = 35mm$$

$$\mu_s = 0,3$$

$$M = 75,32 * 0,3 * 35$$

$$M = 790,85Nmm = 0,79Nm$$

Servomotor EMME-AS-40-M-LV-ASB tillsammans med planetväxel EMGA-40-P-G5-EAS-40 gav ett nominellt vridmoment på 1,05 Nm och ett maximalt vridmoment på 7Nm.

Då det drivande flänshjulet satt monterat direkt på motoraxeln behövde även den radiella belastningen kontrolleras så den inte överskred den maximalt tillåtna radiella belastningen för motorn.

Kontroll av radiell last

Den radiella lasten som uppkom var:

$$m_{max}/fl\ddot{a}nshj\ddot{u}l = 9,6kg$$

$$F_{max} = 9,6 * 9,82$$

$$F_{max} = 94,27N$$

Servomotor EMME-AS-40-M-LV-ASB hade en maximal tillåten radiell belastning på 115N.

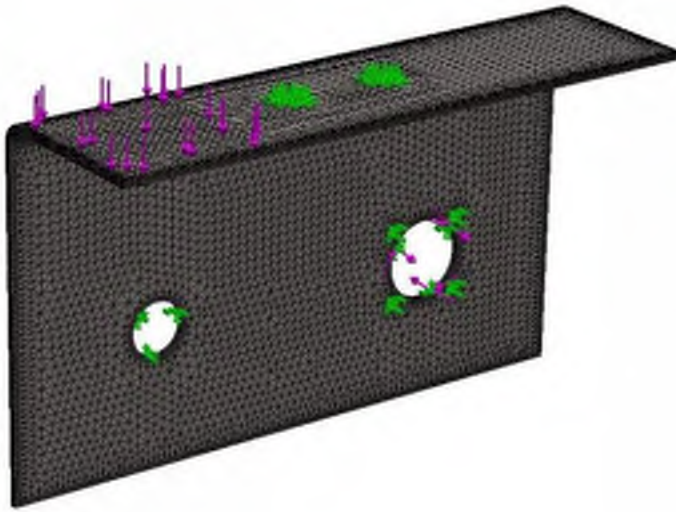
Upphängning

Upphängningen bestod av en bockad plåt med monteringshål för motor och flänshjul. Det satt en upphängning på var sida av kedjetransportören. Upphängningen med motor och växellåda utsattes för störst belastning. Således användes den vid dimensionering av godstjockleken.

Dimensioneringen av upphängningarnas godstjocklek utfördes med hjälp av FEM-analys. Största belastningen uppkom när det tyngsta järnet var placerat direkt över vagnen. Då bar vagnen upp all vikt från armeringsjärnet vilket var en sjättedel av 46 kg samt hälften av vikten av kedjetransportören.

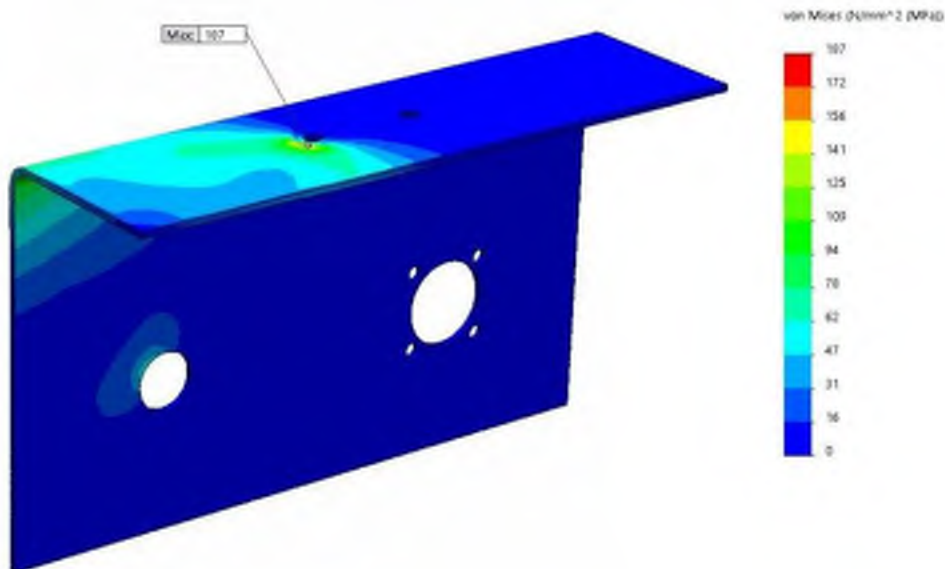
I analysen fixerades upphängningen i motorinfästningen och i skruvhålen för vinkeljärnen. Därefter applicerades en kraft på 240,83N på den ytan där VKR-röret placerades. Två olika moment applicerades på motorinfästningen. Ett böjande moment motsvarande vikt för drivmotor med växellåda med en hävarm på totala längden av motor och växellåda samt ett vridande motsvarande maximala vridmomentet från motorn.

I analysen användes standard mesh med global storlek på 3mm med tolerans på 0,15mm. MESH control med elementstorlek på 1mm applicerades på insidan av skruvhålen, i motorinfästningen, i böckningsradierna samt på kanterna.



Figur 19- FEM-analys av upphängning

Med en godstjocklek på 2mm uppkom den maximala spänningen till 187MPa vilket låg under sträckgränsen för materialet med en säkerhetsfaktor på 1,5.



Figur 20- Spänningsuppkomst vid FEM-analys av upphängning

Vagn med stödskena

Konstruktionen bestod av en stödskena som var monterad på två vagnar, ena med två stycken nylonhjul och andra med ett flänshjul. På flänshjulet satt en motor med växellåda monterad.

Hjul

Den högsta belastningen som hjulen utsattes för uppkom då det tyngsta armeringsjärnet befann sig fixturen. Då bar de tre hjulen upp vikten av stödskenan och vagnar samt vikten av armeringsjärnet.

Totala belastningen gavs av:

$$m_{max} = m_{stödskena} + m_{armering}$$

$$m_{max} = 6,86 + 7,67$$

$$m_{max} = 14,53kg$$

Belastning på flänshjulet gavs av:

$$m_{max} = \frac{m_{max}}{2}$$

$$m_{max} = \frac{14,53}{2}$$

$$m_{max} = 7,27kg$$

Flänshjul från Lyftab med en diameter på 70mm och tillåten belastning på 125 kg/hjul valdes.

Belastning per nylonhjul gavs av:

$$m_{max}/nylonhjul = \frac{m_{max}}{4}$$

$$m_{max}/nylonhjul = \frac{14,53}{4}$$

$$m_{max}/nylonhjul = 3,63kg$$

Nylonhjul typ 82 från Lyftab med diameter 50mm maxbelastning och tillåten belastning på 50kg/hjul valdes.

Motor och växellåda för drivning

Motor och växellåda beräknades på samma sätt och med samma värden som för vagn med kedjetransportör. Där av rekommenderades samma motor och växellåda, Servomotor EMME-AS-40-M-LV-ASB tillsammans med planetväxel EMGA-40-P-G5-EAS-40.

Kontroll av radiell last

Den radiella lasten som uppkom var:

$$\text{Flänshjul } m_{max} = 7,3kg$$

$$F_{max} = 7,3 * 9,82$$

$$F_{max} = 71,69N$$

Servomotor EMME-AS-40-M-LV-ASB hade ett maximal tillåten radiell belastning på 115N.

Stödskena

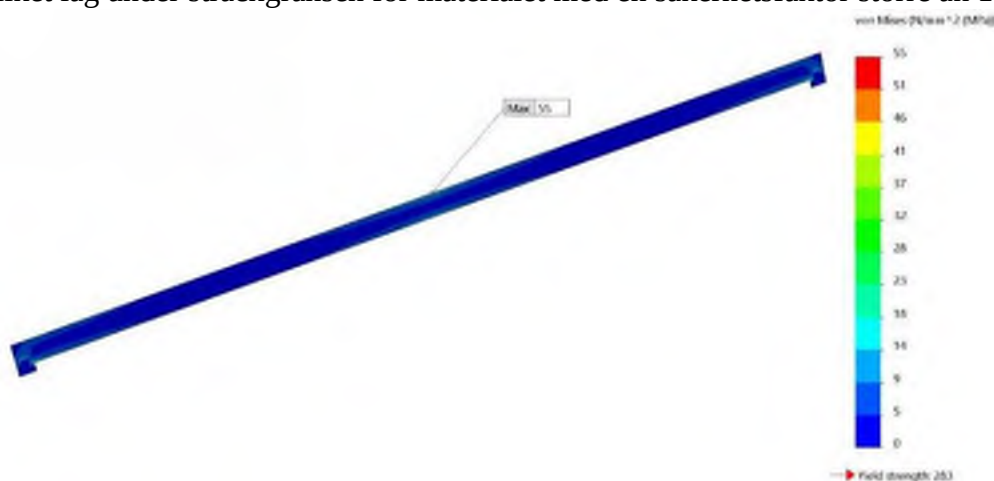
För att dimensionera stödskenans godstjocklek användes FEM-analys. Den största belastning som stödskenan utsattes för var när det tyngsta armeringsjärnet befann sig mitt på stödskenan.

I analysen fixerades fästpunkterna varpå en kraft på motsvarande vikten av det tyngsta armeringsjärnen applicerades mitt på stödskenan. I analysen användes skal-Mesh med en elementstorlek på 3mm och en tolerans på 0,15mm.



Figur 21- FEM-analys av stödskena

Med en godstjocklek på 2mm uppkom den maximala spänningen till 76,26MPa vilket låg under sträckgränsen för materialet med en säkerhetsfaktor större än 1,5.



Figur 22- Spänningsuppkomst vid FEM-analys av stödskena

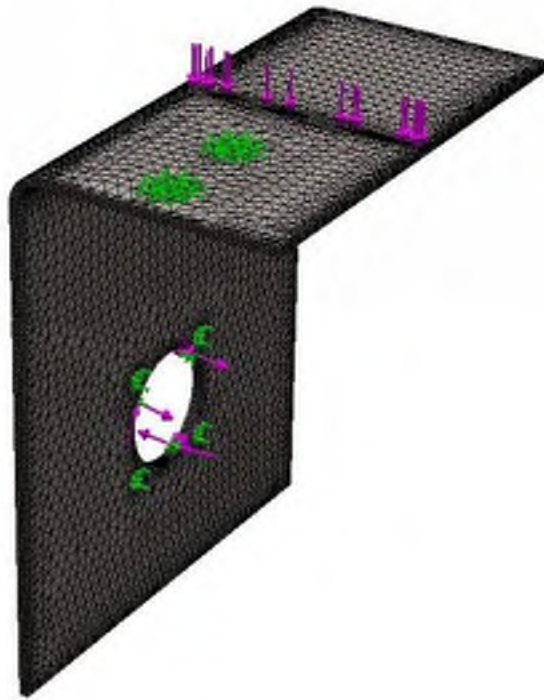
Upphängning

Upphängningen var konstruerad av en böckad plåt. Det satt en upphängning på var sida av stödskenan. Ena upphängningen hade monteringshål för motor och flänshjul och den andra hade monteringshål för två nylonhjul. Upphängningen med motor och växellåda utsattes för störst belastning. Därutav användes den vid dimensionering av godstjockleken.

Dimensioneringen av upphängningens godstjocklek utfördes med hjälp av FEM-analys. Största belastningen uppkom när det tyngsta järnet var placerat direkt över vagnen. Då bar den upp all vikt från armeringsjärnet vilket var en sjättedel av 46 kg.

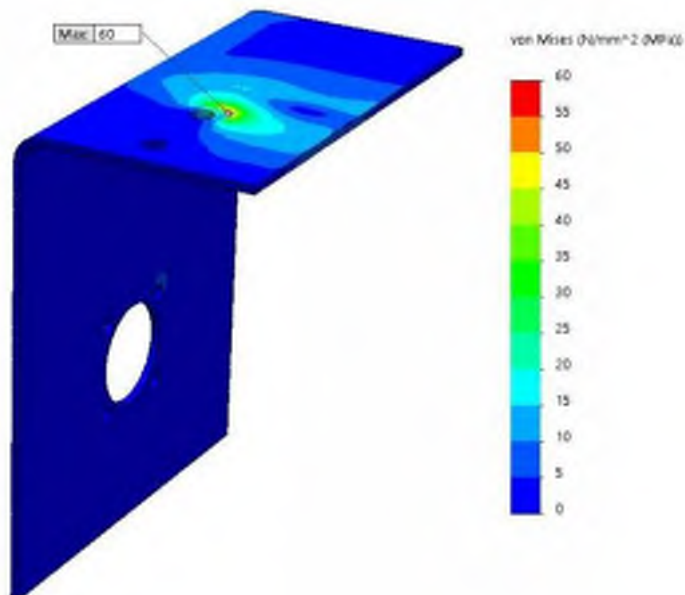
I analysen fixerades vaggan i motorinfästningen och i skruvhålen för vinkeljärnen. Därefter applicerades en kraft på 95,83N på den yta där stödskenan placerades. Två olika moment applicerades på motorinfästningen. Ett böjande moment motsvarande vikt för drivmotor med växellåda med en hävarm på totala längden av motor och växellåda samt ett vridande motsvarande maximala vridmomentet från motorn.

I analysen användes standard mesh med en global storlek på 3mm med en tolerans på 0,15mm. MESH control med elementstorlek på 1mm applicerades på insidan av skruvhålen, i motorinfästningen, i bockningsradierna samt på kanterna.



Figur 23- FEM-analys av upphängning

Med en godstjocklek på 2mm uppgick den maximala spänningen till 60Mpa vilket låg under sträckgränsen för materialet med en säkerhetsfaktor högre än 1,5.



Figur 24- Spänningsuppkomst vid FEM-analys av upphängning

Ram

IPE-balk

Valet av IPE-balk baserades på den maximalt tillåtna nedböjningen samt att flänshjulen var tvungna att kunna löpa i balken. Balken var därav tvungen att vara minst 70mm hög, således utgick beräkningen från IPE100. Nedböjningen uppkom utav den maximala belastningen samt nedböjningen på grund av egenvikten. Balkens längd var 12,2 meter.

Den maximala belastningen uppstod när samtliga vaggor var maximalt ihopkörda. Då bar de två IPE balkarna vikten av vaggorna samt det tyngsta armeringsjärnet. För att förenkla uträkningen sågs den belastningen som en punktlast som verkade mitt på balken. För att få med armeringsjärnets påverkan i beräkningarna lades även vikten per meter för ett 25mm järn med i beräkningen för utbredd last. Sist kontrollerades att den uppkomna böjspänningen i balken inte överskred materialets böjsträckgräns. I beräkningen sågs balken som fritt upplagd.

Tabell 6- Beräkningsdata vid dimensionering av IPE-balk

Last [m]	55,40kg
Säkerhetsfaktor [S_f]	1,5
E-modul [E]	210 000MPa
Tyngdacceleration [g]	9,82N/kg
Sträckgräns böjning [Re_b]	260MPa
Material	SS 141312-00
Yttre tröghetsmoment IPE 100 [I_x]	1 710 000 mm ⁴

$$\delta_{tillåten} = \frac{m \cdot g \cdot S_f \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I_x}$$
$$\delta_{tillåten} = 1\text{mm}$$
$$1\text{mm} = \frac{55,40 \cdot 9,82 \cdot 1,5 \cdot L^3}{48 \cdot 210\,000\text{ MPa} \cdot 1\,710\,000}$$
$$L^3 = \frac{1 \cdot 48 \cdot 210\,000 \cdot 1\,710\,000}{55,40 \cdot 9,82 \cdot 1,5}$$
$$L = 2\,764\text{mm}$$

För att få ett jämt avstånd mellan stödpunkterna sattes första stödet 100mm in på balken och därefter på ett avstånd på 2400mm.

Nedböjning med utbredd last för IPE100 L=2,4m

IPE100 vägde 8,1 kg/m. Avståndet mellan stödpunkterna var 2,4 meter vilket gav en totalvikt på Q=19,44. Armeringsjärn med diametern 25mm vägde 3,83 kg/m, vilket gav en vikt på 9,19kg för ett 2,4 meter långt armeringsjärn.

$$\delta_{utbredd} = \frac{5 \cdot (19,44 + 9,19) \cdot 9,82 \cdot 1,5 \cdot 2400^3}{384 \cdot 210\,000 \cdot 1\,710\,000}$$
$$\delta_{utbredd} = 0,21\text{mm}$$

Nedböjning på grund av punktlast för IPE100 L=2,4m

Nedböjning för punktlast gavs av

$$\begin{aligned}\delta_{\text{punktlast}} &= \frac{m \cdot g \cdot S_f \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I} \\ \delta_{\text{punktlast}} &= \frac{51,52 \cdot 9,82 \cdot 1,5 \cdot 2400^3}{48 \cdot 210\,000 \cdot 1\,710\,000} \\ \delta_{\text{punktlast}} &= 0,61 \text{ mm} \\ \delta_{\text{total}} &= \delta_{\text{utbredd}} + \delta_{\text{punktlast}} = 0,21 + 0,61 \text{ mm} \\ \delta_{\text{total}} &= 0,82 \text{ mm}\end{aligned}$$

Då den totala nedböjningen inte överskred den tillåtna nedböjningen, valdes längden till 2,4 meter.

Kontroll av böjspänning för IPE100

Böjmotstånd W_x för IPE100 var 34200 mm^3

$$\begin{aligned}\sigma_b &= \frac{|M_{\text{max}}|}{W_x} \\ M_{\text{max}} &= M_{\text{utbredd}} + M_{\text{punktlast}} \\ M_{\text{utbredd}} &= -\frac{S_f \cdot Q \cdot g \cdot L}{8} \\ M_{\text{punktlast}} &= -\frac{S_f \cdot m \cdot g \cdot L}{4} \\ M_{\text{max}} &= -\frac{1,5 \cdot (19,44 + 9,19) \cdot 9,82 \cdot 2400}{8} - \frac{1,5 \cdot 51,52 \cdot 9,82 \cdot 2400}{4} \\ M_{\text{max}} &= -581849 \text{ Nmm} \\ \sigma_b &= \frac{|-56519|}{34200} \\ \sigma_b &= 17,01 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Beräknad σ_b överskred inte tillåten Re_b

Därför valdes 12 meter IPE100 med stödpunkter var 2,4 meter.

Fötter

Som stödpunkter för balken valdes Maskinsko MN154 H63 med fästhål från Eugen Wiberger AB. Maskinskena hade en maximalt tillåten statisk belastning på 18 kN.

4.7. Produktstöd

4.7.1. Ritningsunderlag

Totalt skapades elva sammanställningsritningar, 17 detaljritningar samt två hållanvisningar. För fullständiga ritningsunderlag se bilaga 11.

4.7.2. Prototypframtagning

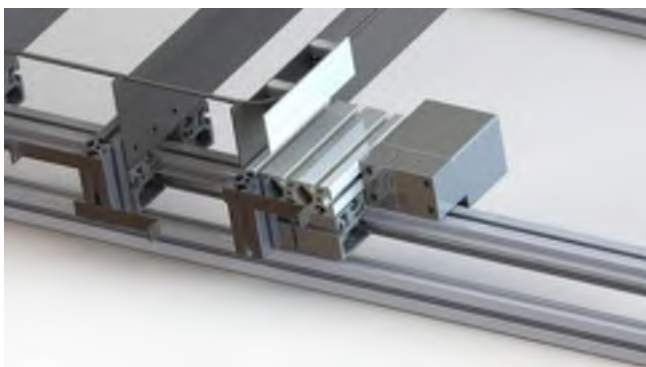
I uppdraget ingick att göra en nedskalad fysisk prototyp av den slutliga fixturen. Prototypen skulle användas som en del i en presentation av den automatiska armeringsstationen. Under presentationen skulle industrirobot IRB1200 från ABB användas till att plocka armeringsjärn från fixturen.

Prototypen innehöll ett antal förenklingar. Istället för de kedjetransportörer som användes i den fullstora fixturen konstruerades prototypen med ett lutande plan så att armeringsjärnen gled ner på stödskenorna. För att minska antalet motorer fördelades avståndet mellan stödskenorna jämnt med hjälp av en konstruktion med dragfjädrar, där en av de yttre skenorna satt fastmonterad vid en av fixturens kortsidor medan den andra drog ut samtliga skenor med hjälp av en motor.

Prototypen valdes att huvudsakligen konstrueras med aluminiumprofiler och drivsystem från Item. Motorn med tillhörande växellåda, som drar isär stödskenorna valdes ur Festos sortiment. För att styra motorn valdes även en motorkontroller från Festos sortiment. Dragfjädrarna valdes ur Lesjöfors sortiment. Utöver detta tillverkades stödskenor och L-järnen som fjädrarna skulle fästas i av Torshälla Industrisvets AB.



Figur 25 - Prototyp



Figur 26- Drivning av prototyp



Figur 27 - Fjäderfästen

5. RESULTAT

Projektet resulterade i ett slutgiltigt koncept. Detta koncept visualiseras nedan med hjälp av CAD-modeller. Konceptet dokumenterades även med fullständiga ritningsunderlag som återfinns i bilaga 11.

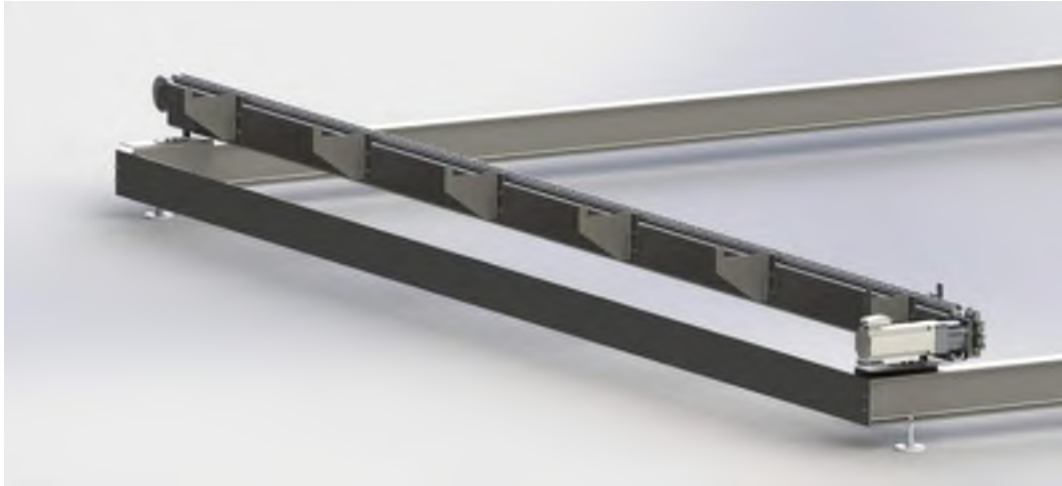
Det slutgiltiga konceptet bestod av två kedjetransportörer och fyra stödskenor som var monterade på vagnar, vilka kunde röra sig i en ram med hjälp av motorer monterade på vagnarna. Kedjetransportörerna drog armeringsjärnet till ett stopp. Därefter gick vagnarna ihop så att armeringsjärnets kortsida gick emot stopp på konsolerna som var monterade på kedjetransportörerna. Fixturen konstruerades för att ta emot armeringsjärn med de maximala dimensionerna 12 x 3m. Ramen bestod av två IPE-balkar som monterats ihop med hjälp av en 2 mm tjock plåt i vardera ände av fixturen.



Figur 28- Fixtur

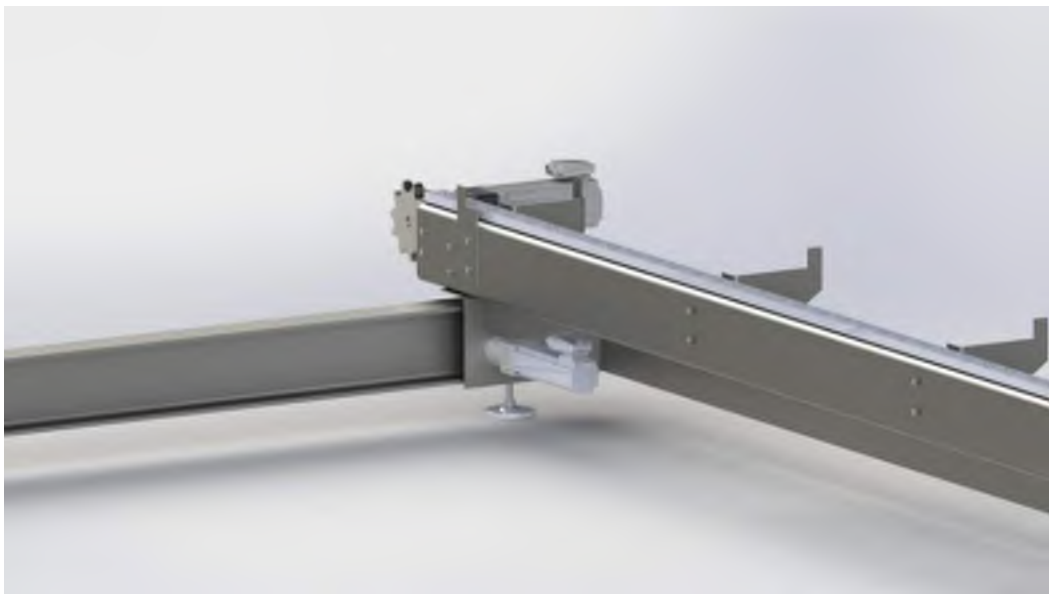
Kedjetransportören bestod av ett VKR-rör där en motor med planetväxel monterats i ena änden. Motor och planetväxel valdes ur Festos sortiment. Motorn drev runt kedjan som löpte i två glidskenor, en som monterades på VKR-rörets ovansida och en som monterades i nederkant på insidan av VKR-röret. För att vändningen av kedjan skulle ske med så lite friktion som möjligt monterades ett nylonhjul från Lyftab i den motsatta änden av VKR-röret i förhållande till motorns placering. För att fixturen skulle kunna ta emot B- och C-järn monterades sex konsoler av bockad plåt på båda kedjetransportörerna, vinkelrätt mot VKR-rörets längdriktning.

Kedjetransportörerna monterades fast på vagnarna med hjälp av ett L-järn per sida.



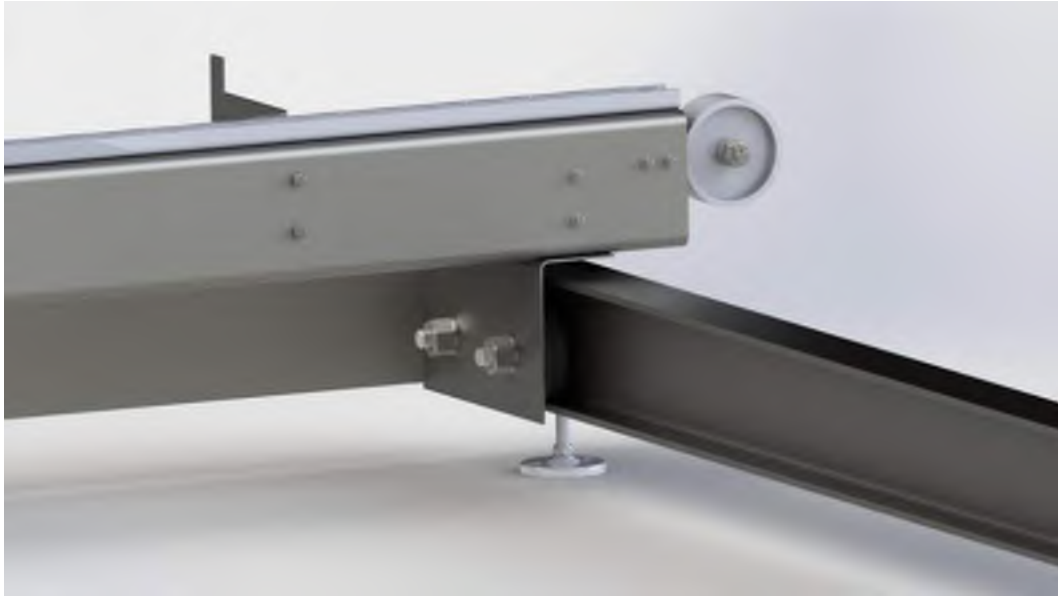
Figur 29- Kedjetransportör

Vagnarna med drivning där kedjetransportörerna monterats bestod av en bockad plåt, på vilken en motor från Festo med tillhörande planetväxel monterats. Drivningen överfördes till ett flänshjul i gjutjärn från Lyftab via planetväxels utgående axel. Ytterligare ett flänshjul monterades på vagnarna för att stabilisera konstruktionen.



Figur 30- Kedjetransportör

Vagnarna utan drivning där kedjetransportörerna monterats bestod av en bockad plåt i vilken ytterligare två flänshjul i gjutjärn från Lyftab monterats.



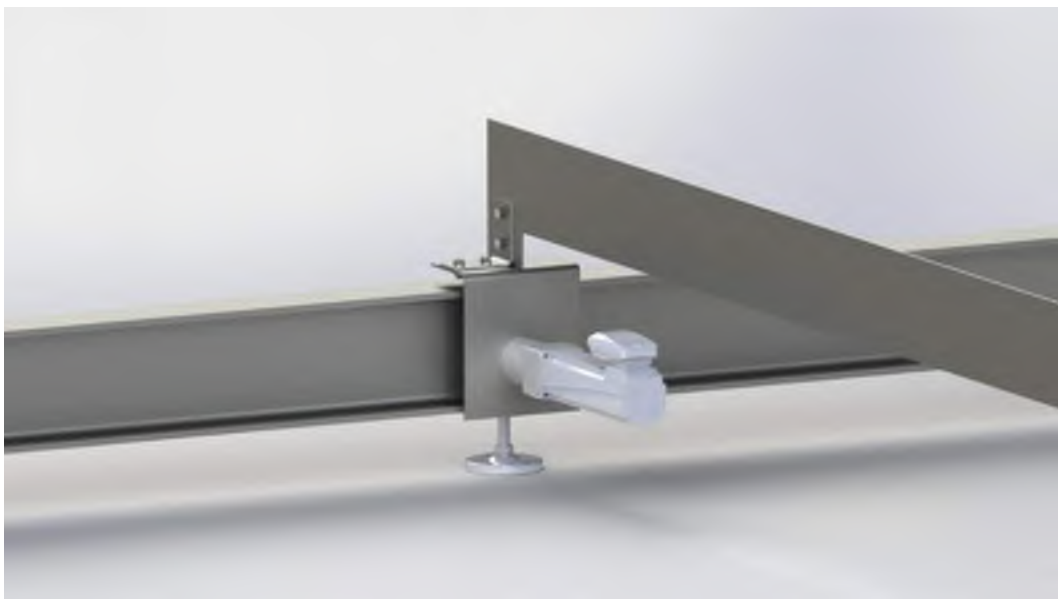
Figur 31- Vagn med flänshjul

Stödskenorna bestod av 2 mm tjocka plåtskivor som monterades på vagnarna med hjälp av L-järn.



Figur 32- Vagn med stödskena

Vagnarna med drivning där stödskenorna monterats bestod av en bockad plåt, på vilken en motor från Festo med tillhörande planetväxel monterats. Drivningen överfördes till ett flänshjul i gjutjärn från Lyftab via planetväxels utgående axel.



Figur 33- Drivning av vagn med stödskena

Vagnarna utan drivning där stödskenorna monterats bestod av en bockad plåt i vilken två nylonhjul från Lyftab monterats.



Figur 34- Vagn med stödskena

6. ANALYS

I detta avsnitt analyseras hur väl resultatet svarade på de frågeställningar som definierades i inledningen av projektet samt de problem som formulerades i problemformuleringen. Här undersöks även om resultatet mötte de krav som ställdes i kravspecifikationen.

6.1. Analys av problemformuleringar

I detta stycke analyseras hur väl resultatet löser de problem som utformades i problemformuleringen.

Armeringsjärnets orientering efter att det har bockats kan variera. Om roboten ska kunna lokalisera armeringsjärnet så måste dess position vara väl definierad.

Fixturen positionerade armeringsjärnet genom att klämma ihop vagnarna. Därefter transporterade fixturen armeringsjärnet till en position som var känd för roboten. Således visste roboten exakt var järnet befann sig.

Fixturen måste vara tillräckligt flexibel för att klara av alla typer av bockningskonfigurationer.

Inför projektet gavs tre olika typer av bockningskonfigurationer att utgå efter (A, B och C). Det ställdes som krav att fixturen skulle kunna hantera alla dem. Om fixturen skulle behärska fler konfigurationer sågs det som en bonus. Om något koncept inte klarade samtliga konfigurationer, så förkastades det. Det slutliga konceptet klarade alla konfigurationerna.

Åtkomst vid greppunkt måste vara tillräckligt stor för att robotverktyget skall få plats.

Åtkomstkraven kring greppunkten förändrades under arbetets gång vilket medförde en del problem. Vissa koncept behövde konstrueras om eller helt avvecklas. Det slutliga konceptet medgav tillräckligt med greppåtkomst för robotverktyget.

6.2. Analys av frågeställning

Här analyseras de frågeställningar som definierades i inledningen av projektet. Frågorna rörde hur fixturen skulle vara konstruerad för att uppfylla de krav som ställdes.

- *Hur bör en fixtur konstrueras för att fixera ett armeringsjärn som levererats från en automatisk bockningsmaskin?*

För att fixturen skulle kunna interagera med bockningsmaskinen krävdes att fixturen alltid var korrekt kalibrerad. Genom att förse fixturen med stödpunkter som var reglerbara i höjdlängd, kunde fixturen kalibreras om det skulle behövas.

- Hur bör en fixtur konstrueras för att möjliggöra greppåtkomst för en industrirobot?

Om nedböjningen av armeringsjärnet blev allt för stort fanns det risk att verktyget skulle krockade med armeringsjärnet när det skulle gå under och greppa. Således sattes den tillåtna nedböjningen av armeringsjärnet vid grepppositionen till en millimeter. För att uppnå det kravet behövdes det stödpunkter för armeringsjärnet på tillräckligt avstånd. Armeringsjärnet fick stöd på långsidan av de fyra stödskenorna samt de två kedjetransportörerna. Fixturen visste på förhand var roboten skulle greppa armeringsjärnet, således kunde en vagn med stödskena placeras i anslutning till den punkten och nedböjningen vid greppunkten var minimal. Armeringsjärn av typ B och C fick stöd på kortsidorna av konsolerna som var monterade på kedjetransportörerna.

6.3. Analys av kravspecifikationen

I detta avsnitt utreds om resultatet uppfyller de krav som formulerades i kravspecifikationen.

Tabell 7- Analys av kravspecifikation

Nr	Krav	Riktvärde	Uppnått
1	Maximal tillåten armeringstyngd:	46kg	Ja
2	Maximal tillåten armeringslängd:	12m	Ja
3	Minimal tillåten armeringslängd:	0,9m	Ja
4	Maximal tillåten armeringshöjd	3m	Ja
5	Maximal diameter armeringsjärn:	25 mm	Ja
6	Minimal diameter armeringsjärn:	12 mm	Ja
7	Klara bockningskonfiguration A, B & C	Ja	Ja
8	Antal grepppunkter	3st	Ja
9	Maximal nedböjning grepppunkt:	1 mm	Ja
10	Minimalt fritt område kring grepppunkter	100mm	Ja
11	Antal typer av bockningar:	3st	Ja
12	Tid för att ställa om:	<30 s	Oklart
13	Antal delar:	<	
14	Maxvikt:	500 kg	
15	Portabel:	Ja	Ja, även om viss demontering skulle krävas
16	Längd:	<16 m	Ja
17	Bredd:	<2,5 m	Nej, går att demontera ner vid transport
18	Flexibel höjd:	Ja	Ja
19	Tåla väta	IP02	Oklart
20	Tåla värme	40 ° C	Oklart
21	Tåla kyla	- 30 ° C	Oklart

Fixturen klarade de flesta krav i kravspecifikationen.

Den tid som fixturen krävde för att ställa om var svår att estimeras, förmodligen var den mindre än de 30 sekunderna som ställdes som krav.

Huruvida fixturen kunde stå emot de temperaturkrav som ställdes var svår att avgöra. Motorerna som valdes hade en arbetstemperatur mellan -10 och +40 grader.

Som krav ställdes att fixturen skulle klara temperaturer ner till -30 grader.

Fixturen skulle alltid vara i en skyddad miljö vid drift, där skulle temperaturen inte underskrida -10 grader. Motorerna kunde komma utsättas för lägre temperaturer vid transport. Om detta skulle orsaka problem bör man överväga att ersätta dem med lämpligare motorer.

Fixturen skulle befinna sig i en skyddad miljö och inte utsättas för väta under drift. Däremot skulle den kunna utsättas för en viss mån av väta vid transport. För att ståldetaljerna inte skulle utsättas för korrosion bör lämplig rostskyddsbehandling undersökas.

Fixturens bredd överskred 2,5m, som ställdes som krav. Måttet baserades på bredden av ett lastbilsflak. Om fixturen inte behövde demonteras vid transport skulle det förenkla transporten avsevärt. Däremot skulle fixturen vara relativt enkel att demontera vilket skulle underlätta vid transporter.

7. DISKUSSION, SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER

7.1. Diskussion

Projektet med att skapa en fixtur för armeringsjärn var mycket lärorikt och gav författarna givande erfarenheter av de utmaningar som kan uppstå under ett produktutvecklingsprojekt. En av svårigheterna i projektet var att flera delprojekt i arbetet med att utveckla en automatisk armeringsstation utfördes parallellt. Detta ledde bland annat till att kravet på utrymme som fixturen måste medge kring robotverktygets grepppunkt på armeringsjärnen förändrades under projektets gång.

Samtliga produktutvecklingsverktyg som användes under projektet uppfattades som användbara. Ett exempel är Gantt-schemat som användes genomgående under projektet. Även om den planering som sattes upp tidigt i projektet inte följdes genom hela tidsperioden bidrog Gantt-schemat till att ge en god överblick över de moment som skulle utföras. Vid användningen av verktyg som Pughs metod var det svårt att fastställa om bedömningen genomfördes objektivt, eller om subjektiva värderingar påverkade resultatet.

En frågeställning som kom upp under projektets gång var vilken typ av bockmaskin som var tänkt att användas i den automatiska armeringsstationen. Detta hade inte undersökts innan det här projektet startat, vilket innebar att tid fick avsättas till att undersöka detta innan konceptgenereringen kunde inledas. Någon specifik typ av bockmaskin valdes ej och det fortsatta arbetet riktades istället in på att göra fixturen kompatibel med flera olika typer av bockmaskiner. Det slutliga konceptet krävde dock att armeringsjärnen kommer från bockmaskinen med långsidan först.

På grund av förseningar vid beställning av material och komponenter till den nedskalade fysiska prototypen försköts hopmonteringen av denna till efter redovisningen av projektet.

7.2. Slutsatser

Syftet med projektet var att skapa ett koncept på en fixtur för armeringsjärn. Konceptet skulle dokumenteras med hjälp av fullständiga ritningsunderlag samt presenteras i form av en fysisk prototyp. Fixturen skulle klara av att positionera armeringsjärn bockade i tre olika konfigurationer. Fixturen behövde också medge tillräckligt grepputrymme för att en robot skulle kunna plocka ett armeringsjärn som fixerats.

Det slutliga konceptet löste samtliga problem som nämndes i problemformuleringen.

Fullständiga ritningsunderlag skapades för det slutliga konceptet. Underlag i form av CAD-modeller samt en komponentlista skapades även för den nedskalade fysiska prototypen. På grund av förseningar vid beställning av komponenterna fick hopmonteringen av prototypen förskjutas till en tidpunkt efter redovisningen av detta projekt.

Analysen visade att det slutliga konceptet uppnådde majoriteten av de krav som ställdes upp i kravspecifikationen. Det var fortfarande oklart om konceptet uppnådde fyra av kraven. För att fastställa detta krävdes viss fortsatt utveckling och testning.

Det slutliga konceptet översteg kravet på en maxbredd om 2,5 meter, vilket kan försvåra transport av fixturen. Fixturen krävde samtidigt en viss bredd, då den skulle kunna ta emot armeringsjärn med maximala dimensionerna 12 x 3 meter.

För att det realiserades det slutliga konceptet krävdes visst vidare arbete, vilket tas upp i nästkommande avsnitt.

7.3. Rekommendationer

I detta projekt lades störst vikt vid att utveckla ett fungerande koncept på en fixtur för armeringsjärn. Vid vidare arbete rekommenderas att genomföra en djupare undersökning av möjligheten för optimering av fixturen med avseende på vikt och tillverkningskostnad. För att underlätta tillverkning av fixturen rekommenderas det att monteringsanvisningar skapas som ett komplement till ritningsunderlaget.

Risken för att korrosion kan påverka fixturens funktion identifierades vid arbetet med FMEA. Vid fortsatt arbete rekommenderas därför att undersöka olika metoder för att förebygga att korrosion uppstår på komponenter i fixturen. Även risken för slitage på grund av friktion mellan armeringsjärnet och stödskenorna samt mellan armeringsjärnet och konsolerna på kedjetransportörerna identifierades. En lösning som bör undersökas var att ersätta skenor och konsoler med metallcylindrar som kan rotera runt sin längdaxel för att på så sätt minska friktionen.

Vid arbetet med DFMain fastställdes det att underhållsanvisningar bör skapas för att minska underhållstiden och risken för felaktigt underhåll. Även möjligheten att anpassa konstruktionen på så sätt att underhåll enbart kan ske på korrekt sätt bör undersökas. För att underlätta underhåll av fixturen rekommenderas även att undersöka möjligheten att öka andelen standardkomponenter i fixturen, då det innebär att tillgången till reservdelar förbättras.

Ytterligare en åtgärd som rekommenderas var att eliminera tidskrävande delmoment vid underhåll, bland annat genom att förbättra åtkomsten till de undre glidlagren.

Vid vidare arbete måste även elektroniksystem såsom motorstyrning undersökas.

8. KÄLLFÖRTECKNING

Litteratur

Bolmsjö, Gunnar. (2006). *Industriell Robotteknik*. 3. uppl. Lund: Studentlitteratur

Dahlberg, Tore. (2012). *Teknisk hållfasthetslära*. 3. uppl. Lund: Studentlitteratur

Ullman, David G. (2010). *The Mechanical design process*. 4. ed. Boston: McGraw-Hill

Ulrich, Karl T. & Eppinger, Steven D. (2011). *Product design and development*. 5th ed. New York, NY: McGraw-Hill/Irwin

Ulrich, Karl T. & Eppinger, Steven D. (2011). *Product design and development*. 5th ed. New York, NY: McGraw-Hill/Irwin

Zienkiewicz O.C, Taylor R.L, Zhu J.Z. (2005). *The Finite Element Method: It's Basis and Fundamental*. 6. Uppl. Oxford: Butterworth-Heinemann.

Österlin, Kenneth. (2012). *Design i fokus för produktutveckling*. 3. uppl. Malmö: Liber AB

Internetkällor

ABB Group. (2014). IRB 1200. *ABB Group*.
https://library.e.abb.com/public/bd8c0f3a077d57e4c1257ceb00722d6e/IRB1200_ROB0275EN.pdf [2016-05-16]

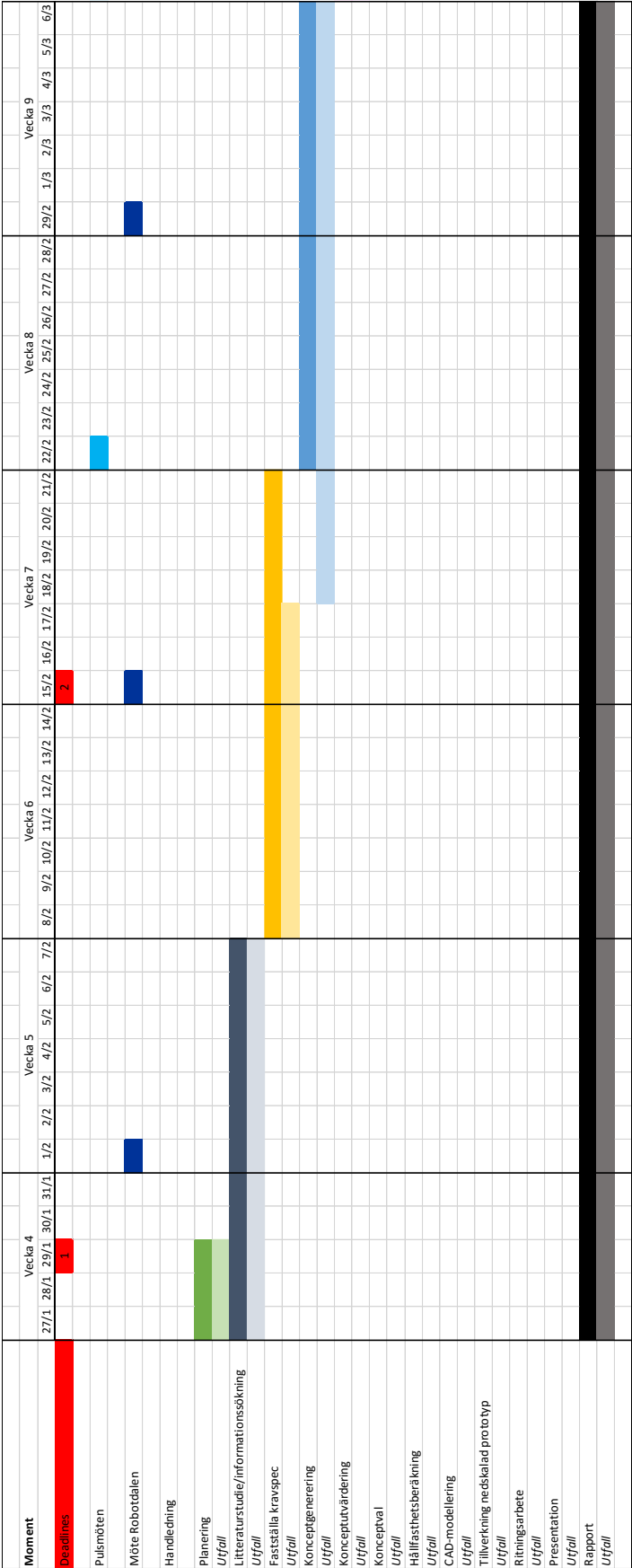
ABB Group. (2016). IRB 4600. *ABB Group*.
https://library.e.abb.com/public/eadd388d8bec4b75a3342026c1631b5e/IRB%204600%20ROB0109EN_H.pdf [Hämtad 2016-05-16]

BE Group. (2016). *Handbok - Armering i grunden*. *BE Group*.
http://www.begroup.com/upload/Sweden/Broschyrrer/Armeringshandbok%202014/BE_Armeringshandbok_140602_webb.pdf [2016-05-14]

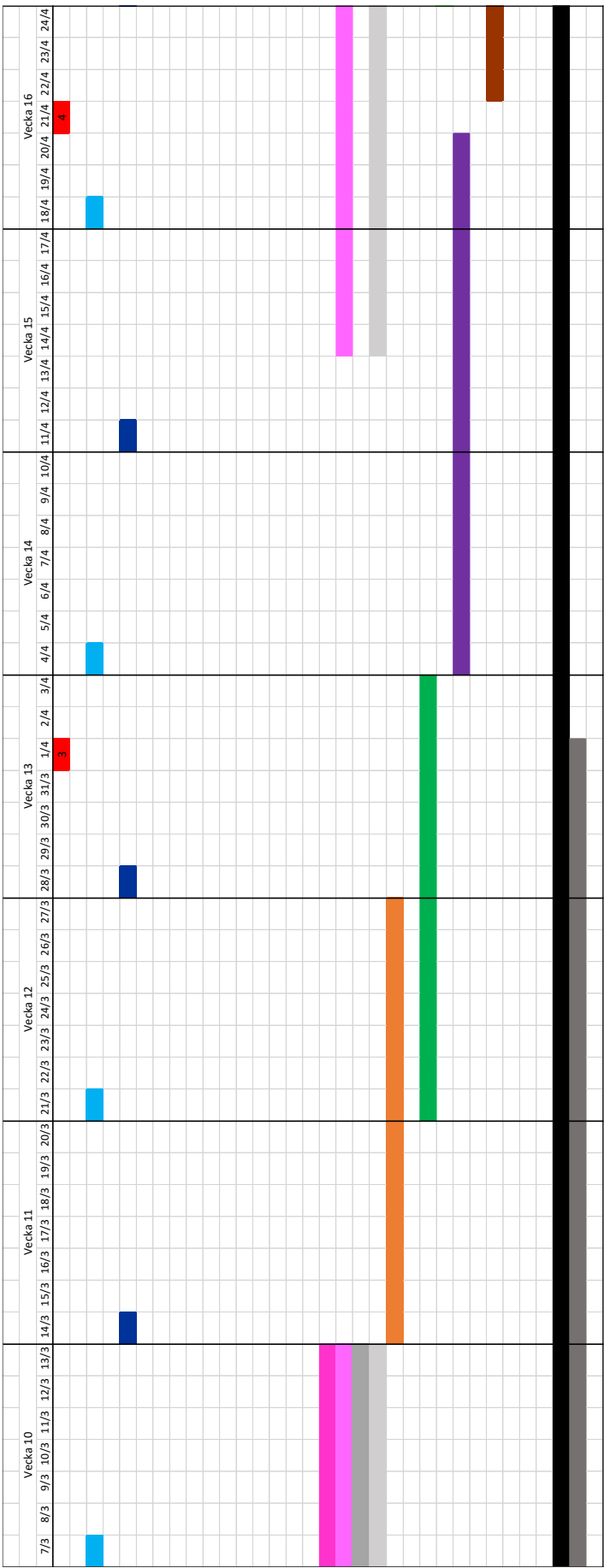
Mulder, W., Blok, J., Hoekstra, S. and Kokkeler, F. G. (2013) Design for maintenance - A set of design guidelines, *University of Twente*.
http://www.utwente.nl/ctw/opm/staff/ME/MulderW/DesignForMaintenance_DesignGuidelines.pdf [2016-05-12]

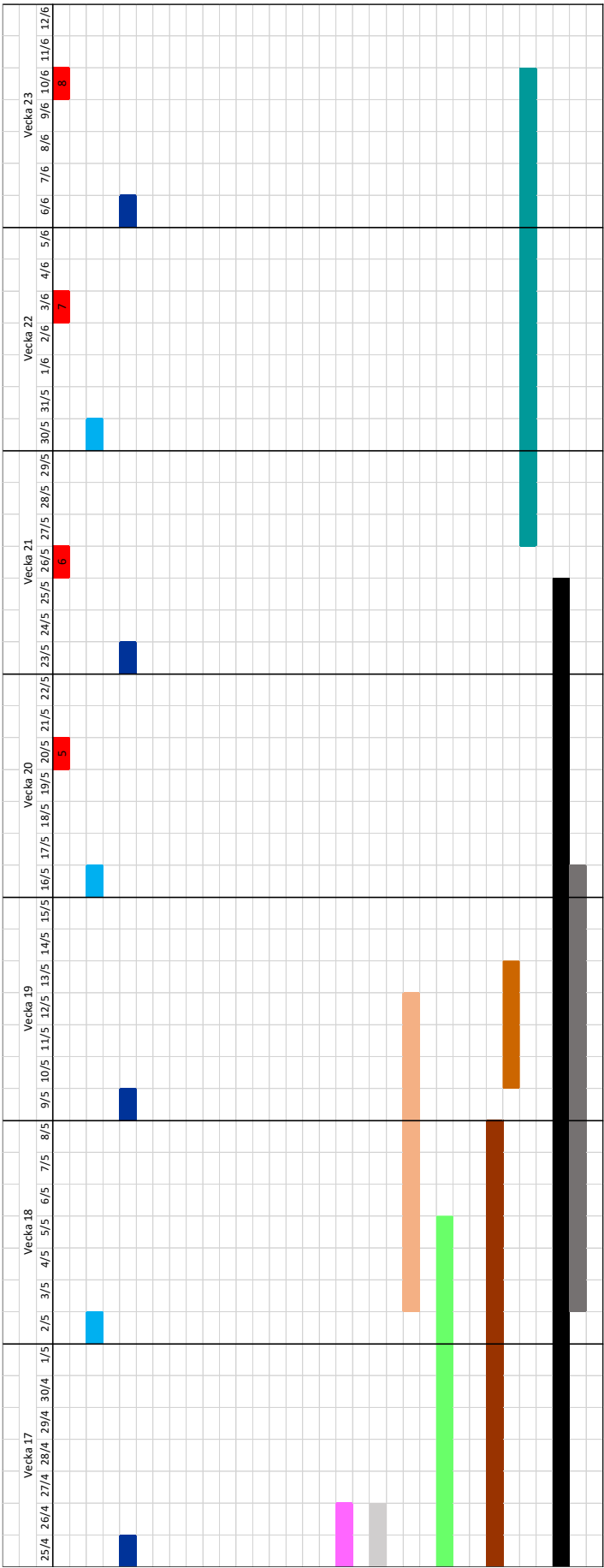
Pärletun, Lars Göran. (2016). Datorstödd konstruktion. *Nationalencyklopedin*,
<http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/datorstödd-konstruktion> [2016-05-08]

BILAGA 1 – Gantt-schema

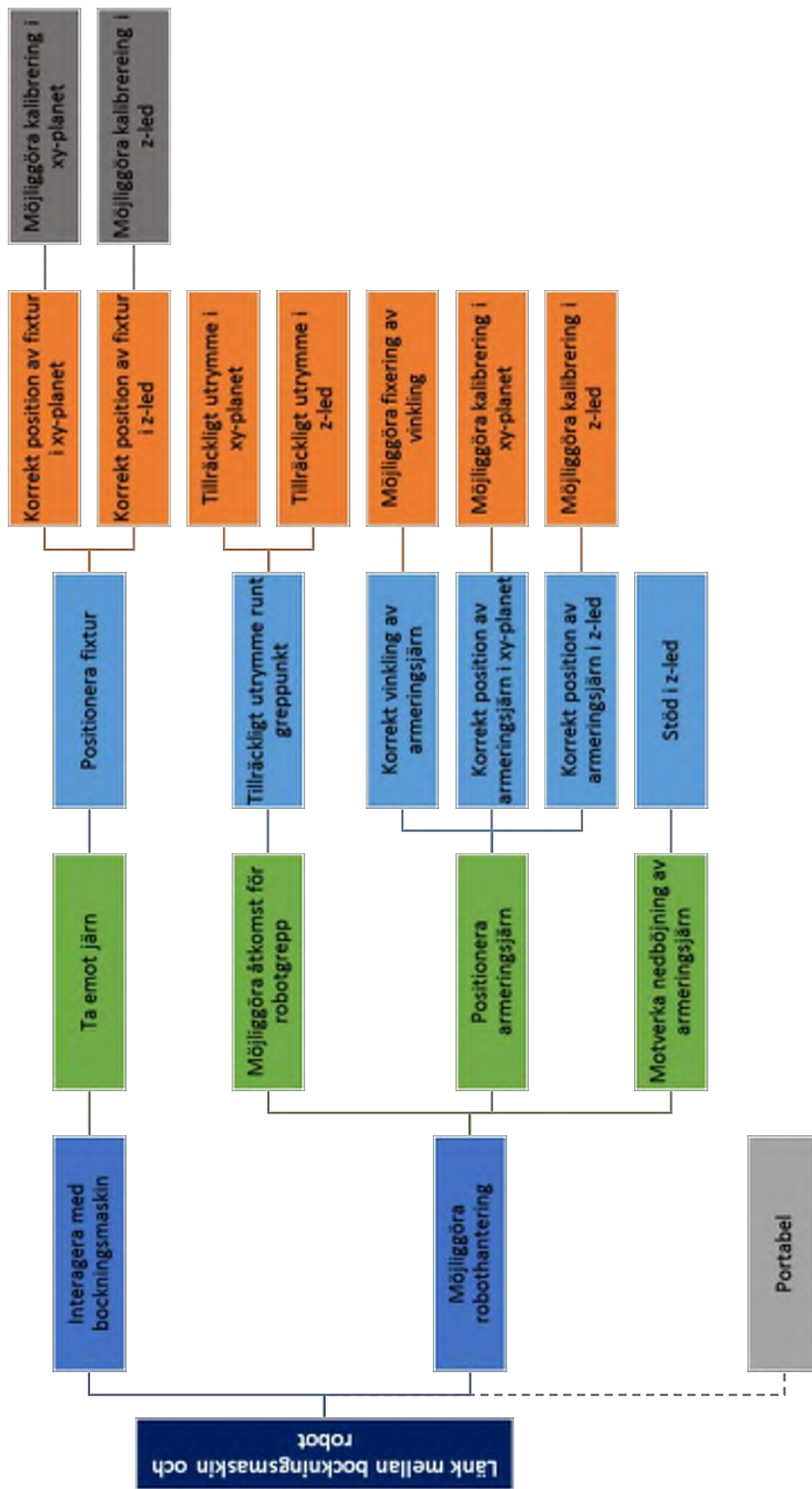


Deadlines:
1: Planeringsrapport klar
2: Presentation av uppdraget för Skanska
3: Halvtidsuppföljning med handledaren på MDH
4: Nedskalad prototyp klar (preliminärt)
5: Rapport till handledare på MDH
6: Rapport till examinator
7: Opponering klar
8: Redovisning

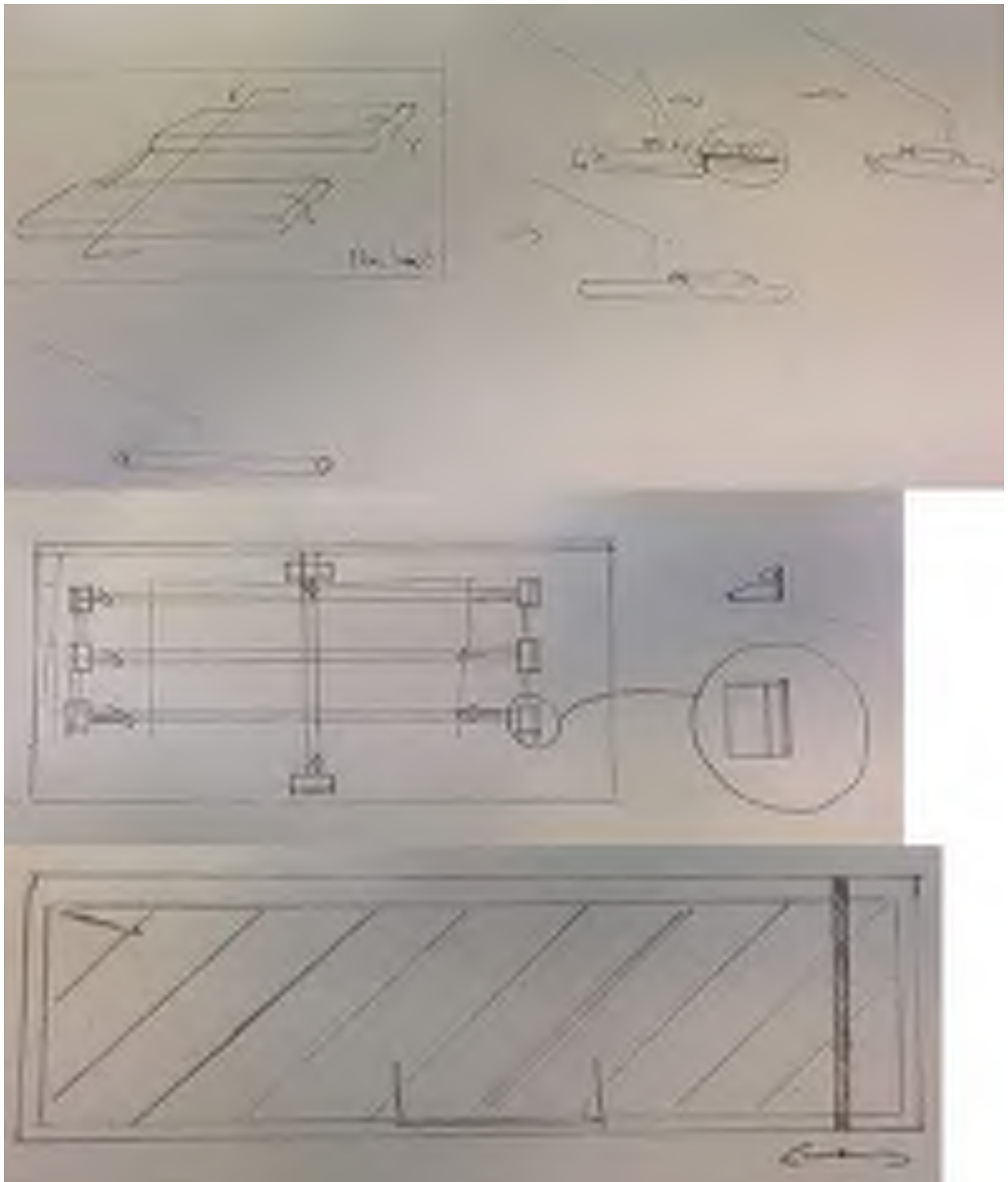




BILAGA 2 – Funktionsträd



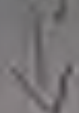
BILAGA 3 – Urval av skisser



Böckningsmaskin



Böckningsmaskin



BILAGA 4 - Pughs matris

Kriterium	viktning	Koncept						
	1-5	1 ref	2	3	4	5		
Lätta att montera/demontera	3	0	0	1	-1	0	1	Nät och rullar
Låg vikt	2	0	0	1	0	0	2	Stag och rullar
Enkel att underhålla	4	0	0	1	-1	0	3	Nät och skiva
Få komponenter	2	0	-1	1	0	0	4	XY-system
standardkomponenter	4	0	0	0	-1	-1	5	Kam
klara flera typer av bockningar	3	0	-1	0	0	-1		
omställningstid	2	0	0	-1	-1	-1		
Lätt att hitta greppunkt	5	0	1	0	1	1		
Robust	4	0	0	0	-1	0		
Tillförlitlig	4	0	0	-1	-1	-1		
Pris	2	0	0	-1	-1	-1		
Anpassningsbar till BM	3	0	0	0	0	0		
Summa +		0	1	4	1	1		
Summa 0		12	9	5	4	6		
Summa -		0	2	3	7	5		
Netto		0	-1	1	-6	-4		
Viktad summa		0	0	3	-18	-10		
Rang		2	3	1	5	4		
Vidareutveckling		Ja	Ja	Ja	Nej	Nej		

BILAGA 5– FMEA: Ram

Nr	Funktion/komponent	Felsätt	Feleffekt	Felorsak	Riskanalys			Rekommenderad åtgärd
					Frekv	Allvar	Uppt	RPN
1	IPE-balk	Överskrider tillåten nedböjning	Robot kan inte greppa armeringsjärn	Underdimensionerad	1	7	6	42
2				För få stödpunkter	1	7	6	42
3		Balken rostar	Högre rullmotstånd för hjulen	Korrosiv miljö	7	4	2	56
4	Sidoskiva							
		Skiva ostabil	Ostabil konstruktion	Underdimensionerad	1	6	1	6
5	Fot	Böjer sig	Nedböjning av balk	Underdimensionerad	1	6	6	36
6		Fot på fel nivå	Nedböjning av balk	Felmonterad	2	7	6	84
7			Fot skadas	Felmonterad	2	6	4	48
	Bedömning av felintensitet	Frekvens	Värdering	Kriterier för bedömning av allvarlighetsgrad	Värdering	Kriterier för bedömning av upptäckssannolikhet		
	O sannolikt att fel kan uppträda	<1/100000	1	Ingen olycksrisk eller inverkan på produkten	1	Fel som alltid uppmärksammas	Värdering	
	Mycket liten sannolikhet för fel	<1/10000	2 - 3	Ingen olycksrisk eller inverkan på produkten men intakt funktion	2 - 3	Normal sannolikhet för upptäckt	1	
	Låg sannolikhet för fel	<1/1000	4 - 5	Mycket liten olycksrisk eller risk för störd funktion	4 - 6	Viss sannolikhet för upptäckt	2 - 4	
	Viss sannolikhet för fel	<1/100	6 - 7	Olycksrisk under speciella omständigheter eller utebliven funktion	7 - 9	Liten sannolikhet för upptäckt	5 - 7	
	Hög sannolikhet för fel	<1/10	8 - 9	Allvarligt risk för personskada	10	O sannolikt att fel upptäcks	8 - 9	
	Mycket hög sannolikhet för fel	<1/1	10				10	

BILAGA 6 – FMEA: Vagn med kedjetransportör

Nr	Funktion/komponent	Felsätt	Feleffekt	Felorsak	Riskanalys			Rekommenderad åtgärd
					Frekv	Allvar	Uppt	RPN
1	VKR-rör	Överskrider tillåten nedböjning	Robot kan inte greppa armeringsjärn	Underdimensionerad	1	7	6	42 Använd säkerhetsfaktor
2	Motor och växellåda (kedjedrift)	Motor slutar fungera	Kan ej positionera järn	Ingen strömförsörjning	2	7	1	14 Fastställa att kablar sitter korrekt
3				Motor trasig	2	7	1	14 Kvalitetskrav på leverantör
4		Otillräckligt vridmoment	Kan ej positionera järn	Underdimensionerad	1	7	4	28 Dimensioner för nominellt vridmoment
5	Kedjedrev	Skadad kugg	Ojämn drivning	Slitage	2	2	3	12 Förebyggande underhåll
6	Kedja	Kedja går av	Kan ej positionera järn	Underdimensionerad	1	7	1	7 Använd säkerhetsfaktor
7				Slitage	2	7	1	14 Använd gidskena samt förebyggande underhåll
8		Kedja ej följsam	Ojämn drivning	Otillräcklig smörjning	3	2	2	12 Förebyggande underhåll
9		Kedjan lossnar från drev/hjul	Kan ej positionera järn	Otillräcklig sträckning	3	7	1	21 Kedjespännare bör undersökas vi vidare arbete
10	Motorfäste	Motorfäste deformeras	Drivning påverkas	Underdimensionerad	1	5	4	20 Använd säkerhetsfaktor
11	Kedjehjul	Kedjehjul deformeras	Drivning påverkas	Underdimensionerad	1	7	3	21 Använd säkerhetsfaktor
12				Slitage från kedja	4	4	3	48 Förebyggande underhåll
13	Konsol	Konsol böjs i sidled	Deformation	Utmattning pga friktion	3	5	2	30 Minska friktion mellan järn och konsol
14		Konsol skadas	Järnet positioneras ojämnt	Friktion	6	2	3	36 Minska friktion mellan järn och konsol
15	Stopp	Stopp skadas	Järnet positioneras ojämnt	Friktion	6	2	3	36 Minska friktion mellan järn och stopp
16	Upphängning	Upphängning deformeras	Skrapar IPE-balk	Underdimensionerad	1	5	2	10 Använd säkerhetsfaktor
17			Överanstränger motorn	Underdimensionerad	1	5	3	15 Använd säkerhetsfaktor
18	Flänsdjul	Lagerhaveri	Tyngre drift	Smuts i lagret	2	3	2	12 Avhjälpande underhåll
19				Överbelastning	1	3	2	6 Använd säkerhetsfaktor
20		Flänsdjul deformeras	Ojämn gång	Underdimensionerad	1	5	3	15 Använd säkerhetsfaktor
21	Motor och växellåda (långsögande drift)	Motor slutar fungera	Kan ej positionera kedjetransportör	Ingen strömförsörjning	2	7	1	14 Fastställa att kablar sitter korrekt
22				Motor trasig	1	7	1	7 Kvalitetskrav på leverantör
23		Otillräckligt vridmoment	Kan ej positionera kedjetransportör	Underdimensionerad	1	7	4	28 Dimensioner för nominellt vridmoment
	Bedömning av felintensitet	Frekvens	Kriterier för bedömning av allvarighetsgrad	Värdering	Kriterier för bedömning av upptäckssannolikhet			Värde ring
	O sannolikt att fel kan uppträda	<1/100000	Ingen olycksrisk eller i nverkan på produkten	1	Fel som alltid uppmärksammas			1
	Mycket liten sannolikhet för fel	<1/10000	Ingen olycksrisk eller i nverkan på produkten	2 - 3	Normal sannolikhet för upptäckt			2 - 4
	Låg sannolikhet för fel	<1/1000	Ingen olycksrisk eller i nverkan på produkten men intakt funktion	4 - 5	Viss sannolikhet för upptäckt			5 - 7
	Viss sannolikhet för fel	<1/100	Mycket liten olycksrisk eller risk för störd funktion	6 - 7	Liten sannolikhet för upptäckt			8 - 9
	Hög sannolikhet för fel	<1/10	Olycksrisk under speciella omständigheter eller utebliven funktion	8 - 9	Osannolikt att fel upptäcks			10
	Mycket hög sannolikhet för fel	<1/1	Allvarligt risk för personskada	10				

BILAGA 7 – FMEA: Vagn med stödskena

Nr	Funktion/komponent	Felsätt	Feleffekt	Felorsak	Riskanalys				Rekommenderad åtgärd
					Frekv	Allvar	Uppt	RPN	
1	Stödskena	Skena skadas	Järnet positioneras ojämnt	Friktion	7	2	3	42	Minska friktion mellan järn och skena
2		Skena böjs mot L-järn	Deformation	Utmattning pga friktion	3	5	2	30	Minska friktion mellan järn och skena
3	Upphängning	Upphängning deformeras	Skrapar IPE-balk	Underdimensionerad	1	5	2	10	Använd säkerhetsfaktor
4			Överanstränger motorn	Underdimensionerad	1	5	3	15	Använd säkerhetsfaktor
5	Flänshjul	Flänshjul deformeras	Ojämn gång	Underdimensionerad	1	5	3	15	Använd säkerhetsfaktor
6	Nylonhjul	Nylonhjul deformeras	Ojämn gång	Underdimensionerad	1	4	4	16	Använd säkerhetsfaktor
7		Gidlager skadas	Tyngre gång	Smuts i lagret	2	3	2	12	Avhjälpande underhåll
8	Motor och växelåda (Längsgående drift)	Motor slutar fungera	Kan ej positionera skena	Ingen strömförsörjning	2	7	1	14	Fastställa att kablar sitter korrekt
9				Motor trasig	1	7	1	7	Kvalitetskrav på leverantör
10		Otillräckligt vridmoment	Kan ej positionera skena	Underdimensionerad	1	7	4	28	Dimensioner för nominellt vridmoment
Bedömning av felintensitet				Värdering			Kriterier för bedömning av upptäckssannolikhet		
Osannolikt att fel kan uppträda				1			Fel som alltid uppmärksammas		
Mycket liten sannolikhet för fel				2 - 3			Normal sannolikhet för upptäckt		
Lågsannolikhet för fel				4 - 5			Visssannolikhet för upptäckt		
Visssannolikhet för fel				6 - 7			Liten sannolikhet för upptäckt		
Högsannolikhet för fel				8 - 9			Osannolikt att fel upptäcks		
Mycket hög sannolikhet för fel				10			10		

BILAGA 8 – DFMain: Riktlinjer för att förenkla underhåll

Riktlinjer för att förenkla underhåll	Kommentar	Åtgärd
Använd material som inte förlänger underhållstiden	Använder stål.	Ingen åtgärd. Rostskydd bör ses över i vidare arbete.
Använd standardkomponenter	Icke-komplicerade komponenter.	Ingen åtgärd
Använd fästelement som förenklar underhållsarbetet	Använder standardskruvar	Ingen åtgärd
Säkerställ att operatörerna kan underhålla utrustningen	Relativt okomplicerad konstruktion, gör den lätt att underhålla.	Ingen åtgärd
Tillåt tillräckligt utrymme för underhåll	Ont om utrymme vid byte av undre glidskena. Låg arbetshöjd ger en ansträngd arbetsställning vid underhåll.	Bör ses över vid fortsatt arbete.
Designa utrustning så att den endast kan underhållas på ett korrekt sätt	Vinkeljärn kan monteras fel vilket kan orsaka driftfel. Risk att konsolerna monteras på fel sida.	Förslag för vidare arbete: • Markera ut monteringsposition • Notera i underhållsinstruktionen
Komponenter som behöver bytas ut ofta ska vara enkla att hantera	Inga stora tyngder på komponenterna. Skarpa hörn på t.ex. konsolerna.	Ingen åtgärd
Garantera säkerhet genom konstruktion	Konstruerad för minimal kontakt med människor.	Ingen åtgärd
Konstruera modulsytem.	Lätt att byta ut hela delsammanställningar.	Ingen åtgärd
Använd standardgränssnitt mellan moduler och delsystem	Skruvförband används mellan alla delsammanställningar.	Ingen åtgärd
Konstruera den svagaste länken	Inte applicerbart.	Inte applicerbart
Placera underhållspositioner nära varandra.	Inte applicerbart.	Inte applicerbart.

BILAGA 9 – DFMain: Riktlinjer för att förbättra tillförlitlighet

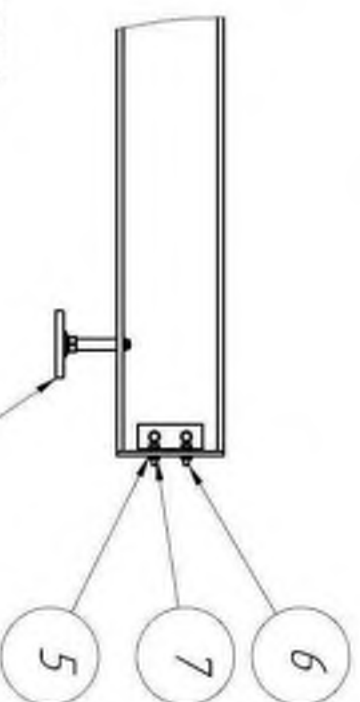
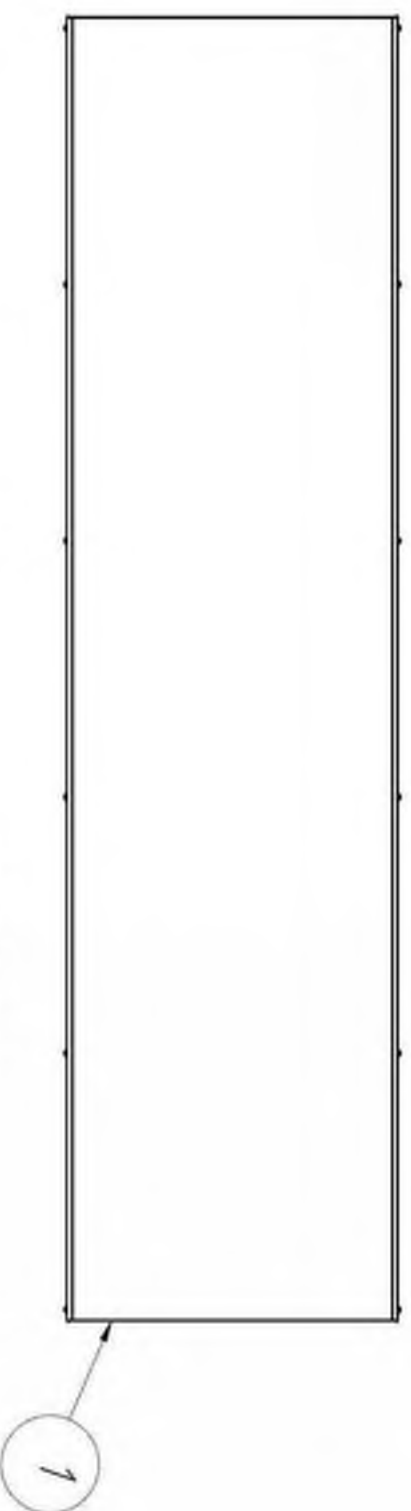
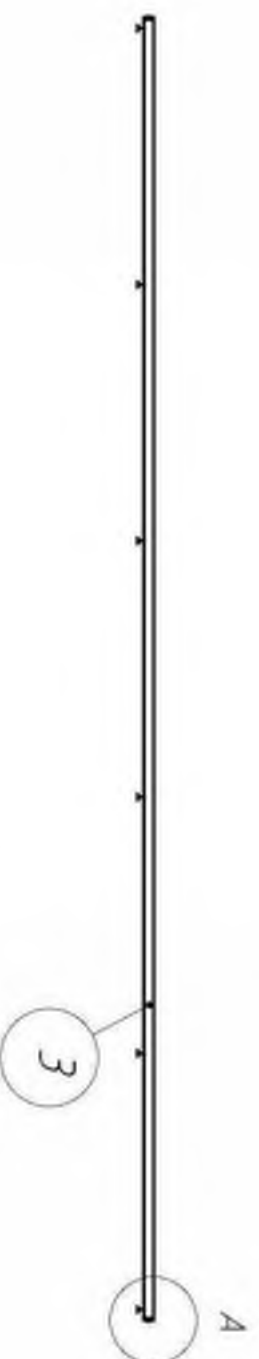
Riktlinjer för att förbättra tillförlitlighet	Kommentar	Åtgärd
Undvik rörliga delar i konstruktionen.	Många rörliga delar i konstruktionen.	Ingen åtgärd
Undvik icke-kritiska delar.	Målsättning att använda minimalt antal delar.	Ingen åtgärd
Undvik flexibla delar/undvik icke-flexibla delar.	Inte applicerbart.	Inte applicerbart.
Konstruera för underbelastad användning.	Inräknad säkerhetsfaktor. Motor dimensionernas efter nominellt vridmoment.	Ingen åtgärd
Medge redundans.	Ingen redundans.	Ingen åtgärd
Överdimensionera kritiska komponenter	Inräknad säkerhetsfaktor. Transportkedja, hjul, motorer samt fötter är överdimensionerade.	Ingen åtgärd
Välj material som tål den omgivande miljön	Konstruktionen tål arbetsmiljön. Fukt vid frakt kan orsaka problem.	Ingen åtgärd. Rostskydd bör ses över i vidare arbete.
Använd inte lackerade, målade eller pläterade komponenter.	Har inte använts.	Ingen åtgärd
Använd komponenter och material med verifierad tillförlitlighet.	Beprövad teknik har använts.	Ingen åtgärd
Konstruera robusta gränssnitt mellan komponenter.	Skruvförband används mellan alla delsammanställningar.	Ingen åtgärd
Använd parallella system och komponenter.	Parallella system används inte.	Ingen åtgärd
Distribuera last jämt över parallella system och komponenter.	Lastbärande komponenter delar jämt på tyngden av armeringsjärnet.	Ingen åtgärd

BILAGA 10 – DFMain: Riktlinjer för att öka möjligheten att underhålla systemet

Riktlinjer för att öka möjligheten att underhålla systemet	Kommentar	Åtgärd
Använd standardkomponenter.	Många icke-standardkomponenter	Bör ses över vid vidare arbete.
Undvik dyra reservdelar som måste lagerhållas.	Inga dyra komponenter som måste lagerhållas	Ingen åtgärd
Minimera antalet olika fästelement.	Antalet olika fästelement har minimerats.	Ingen åtgärd
Spara användbar livstidsdata.	Inte applicerbart.	Inte applicerbart
Undvik tidskrävande delmoment för underhåll.	Utbyte av undre glidskena innehåller tidskrävande delmoment.	Bör ses över vid fortsatt arbete.
Konstruera för användning av standardverktyg.	Inga icke-standardverktyg krävs.	Ingen åtgärd
Använd inte material som skadar personalens hälsa.	Material som skadar personalens hälsa används inte.	Ingen åtgärd
Konstruera systemet så att underhåll kan planeras.	Jämn fördelning på lastbärande delar. Uthållighet har inte undersökts i detta projekt.	Uthållighet bör ses över i vidare arbete.
Bygg in övervakningssystem.	Inte applicerbart.	Inte applicerbart.
Säkerställ att så få tekniker som möjligt krävs vid underhåll.	Vissa moment kan kräva två tekniker.	Ingen åtgärd
Personal med varierad bakgrund ska kunna utföra underhåll.	Inga komplexa moment vid underhåll.	Ingen åtgärd
Skapa förståeliga underhållsinstruktioner.	Kommer inte utföras i detta projekt.	Bör skapas vid fortsatt arbete.

BILAGA 11 – Ritningar

Antal	Beskrivning	Komponent	Ritningsnummer	Köp/Tillverka	Vikt/styck (g)	Leverantör
1	Konsol V med stopp	2016-305-11002	2016-305-11102	Tillverka	198	
5	Konsol Vänster	2016-305-11001	2016-305-11101	Tillverka	196	
4	L-Järn	2016-305-6001	2016-305-6101	Tillverka	67	
2	Upphängning	2016-305-9001	2016-305-9101	Tillverka	543	
2	Upphängning	2016-305-8001	2016-305-8101	Tillverka	537	
2	Hjulfäste	2016-305-7002	2016-305-7102	Tillverka	46	
2	Nylonhjul	typ82_762513	N/A	Köp	112	Lyftab
4	Glidskena	2016-305-7001	2016-305-7101	Tillverka	993	
2	Motorfäste	2016-305-7005	2016-305-7105	Tillverka	245	
1	Konsol höger med stopp	2016-305-7004	2016-305-7104	Tillverka	198	
5	Konsol höger	2016-305-7003	2016-305-7103	Tillverka	196	
2	Stopp	2016-305-7006	2016-305-7106	Tillverka	86	
2	Kedjedrev	Chain wheel ISO - 11Z 16A-1--11SA14.0N	N/A	Köp		
2	Servomotor	EMME-AS-60-S-LS-ASB	N/A	Köp	1650	Festo
2	Växellåda	EMGA-60-P-G5-EAS-60	N/A	Köp	900	Festo
2	VKR100	VKR100	VKR100	Köp	21467	Tibnor
6	Servomotor	EMME-AS-40-M-LV-ASB	N/A	Köp	850	Festo
6	Växellåda	EMGA-40-P-G5-EAS-40	N/A	Köp	350	Festo
12	Flänshjul	Flanshjul_789100	N/A	Köp	750	Lyftab
4	Upphängning	2016-305-5001	2016-305-5101	Tillverka	279	
4	Stödskena	2016-305-3002	2016-305-3102	Tillverka	4172	
8	L-Järn	2016-305-3001	2016-305-3101	Tillverka	45	
8	Nylonhjul	Nylonhjul_Typ82_793714	N/A	Köp	38	Lyftab
4	Upphängning	2016-305-4001	2016-305-4101	Tillverka	287	
12	Maskinfot	mn154_63-m10x50	N/A	Köp	26	Eugen Wiberger
2	IPE100	IPE100	IPE100	Köp	98938	Tibnor
4	Vinkeljärn	2016-305-2002	2016-305-2102	Tillverka	41	
2	Kortsida	2016-305-2001	2016-305-2101	Tillverka	9741	
2	Transportkedja	C2040HP	N/A	Köp		Iwis
97	Fästelement	hex thin nut chamfered gradeab_iso	N/A	Köp		
16	Fästelement	hex bolt gradeb_iso	N/A	Köp		
188	Fästelement	plain washer normal grade a_iso	N/A	Köp		
40	Fästelement	hex bolt gradeb_iso	N/A	Köp		
2	Fästelement	ISO 7046-1 - M3 x 5 - Z --- 5N	N/A	Köp		
6	Fästelement	ISO 7046-1 - M3 x 6 - Z --- 6N	N/A	Köp		
42	Fästelement	hex bolt gradeb_iso	N/A	Köp		



DETAIL A
SCALE 1:5

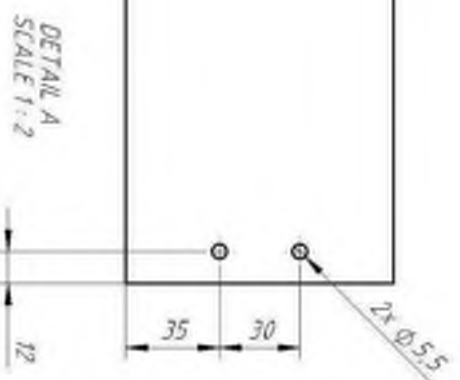
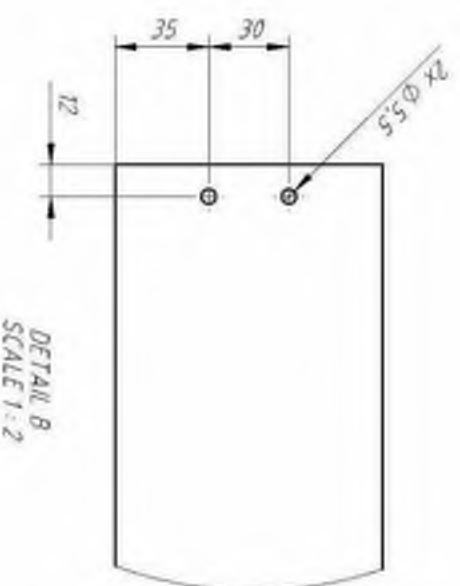
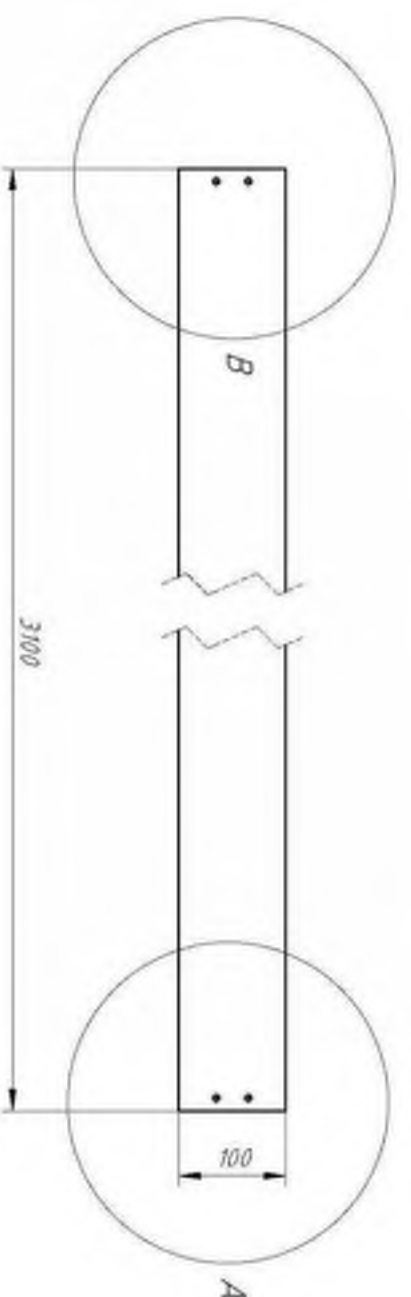
Vikt: 217848.50g

7	16	hex thin nut chamfered gradeab_iso	
6	16	hex bolt gradeab_iso	
5	32	plain washer normal grade a_iso	
4	12	Maskinfol	Wibergner-mm154_63-m10x50
3	2		IPE100
2	4	Vinkeljarn	2016-305-2002
1	2	Kortsida	2016-305-2001
50 mm	100 mm	Refrimning	by befogare
MA & ML	2016-305-2100	2016-305-2000	150



2016-305-2100
Ram

1 (1)



Vihit: 9740.93 g

Šarpa kanter brufna.

1023 Carbon Steel Sheet (SS)

MA & ML



MA & ML

2016-305-2101

Koritsida

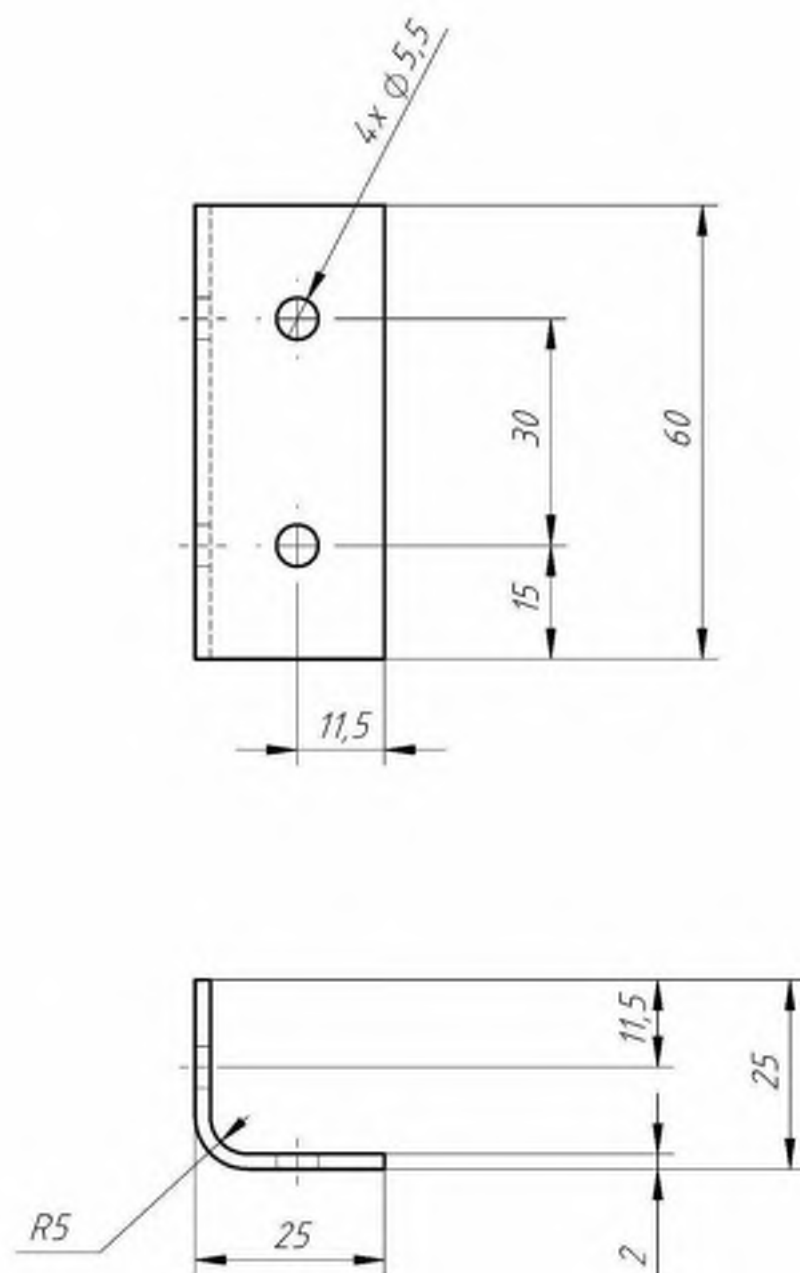
6.4

1.5

2016-305-2001

7 (1)

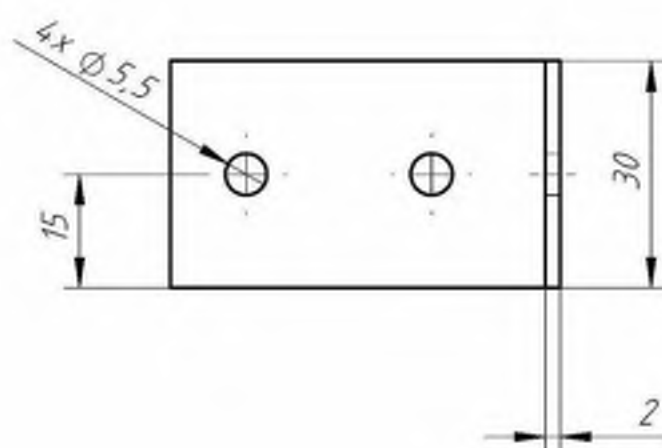
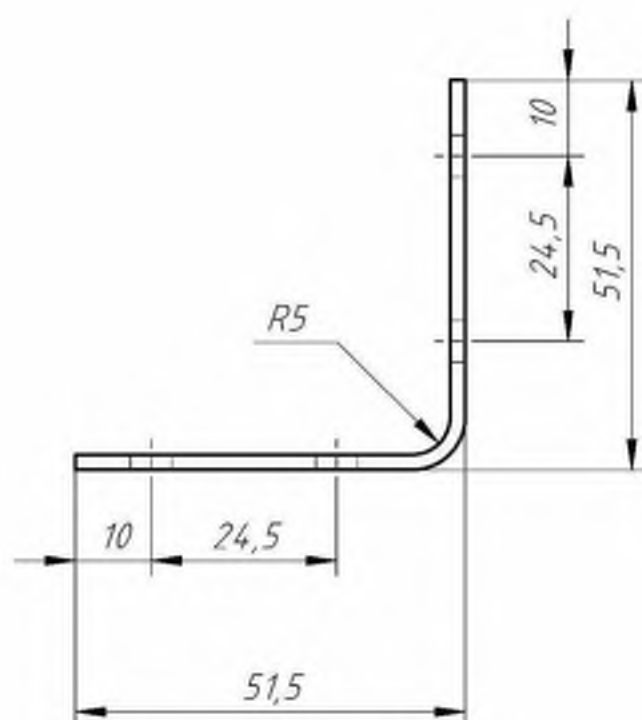
MAJAKULENS KESKUS
EESTISTONIA KESKUS



Vikt: 41.34 g

Skarpa kanter brutna.

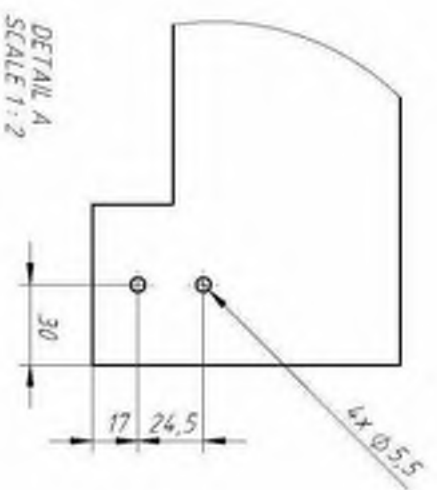
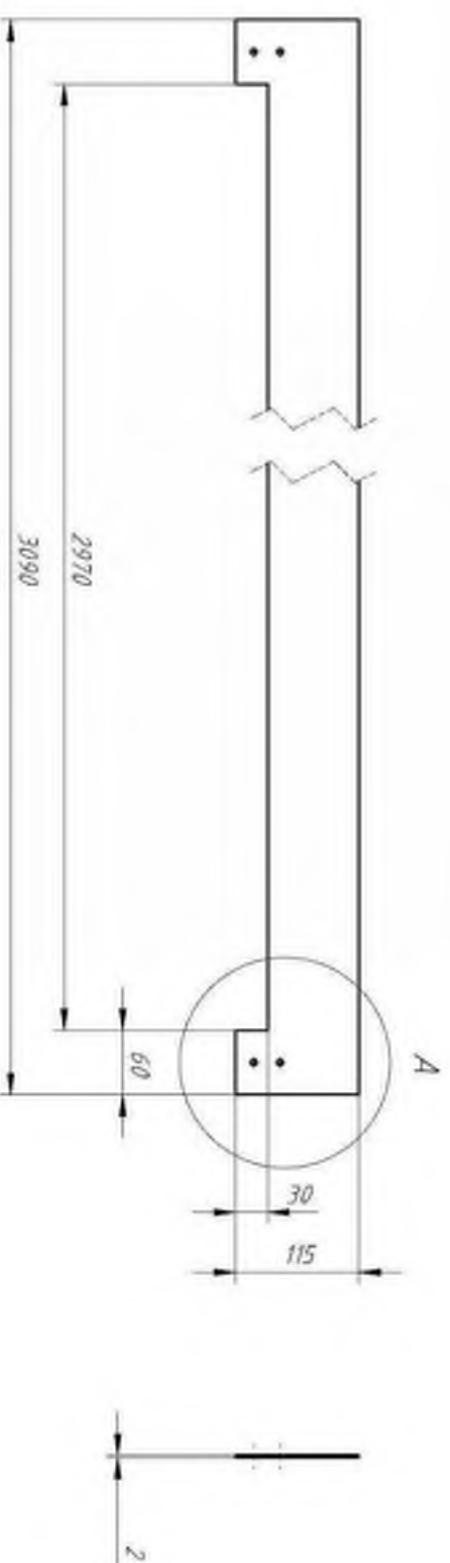
Material 1023 Carbon Steel Sheet (SS)			Dimension / kommentar			
Konstruerad av MA & ML	Granskad av	Godkänd av - datum	Generell tolerans ISO 2768 m	Generell ytförhållande Ra 6.4	Vyplacering 	Skala 1:1
 MÄLARDALENS HÖGSKOLA ESKILSTUNA VÄSTERÅS			Riftningsnummer 2016-305-2102		Artikel / modellnamn 2016-305-2002	
			Titel/Benämning Vinkeljörn			Utgåva 1(1)



Vikt: 44.91g

Skarpa kanter brutna.

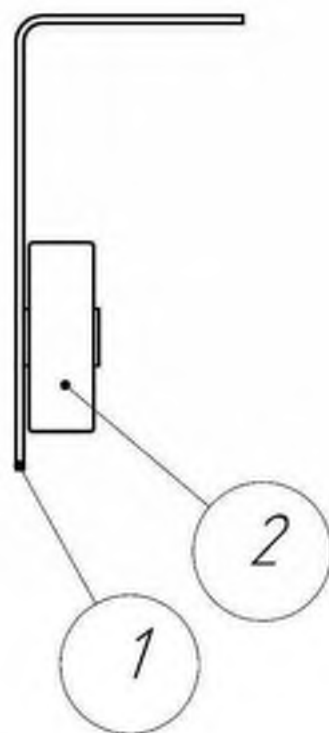
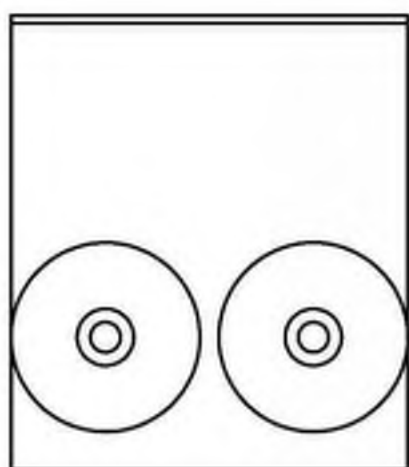
Material		Dimension / kommentar				
1023 Carbon Steel Sheet (SS)						
Konstruerad av	Granskad av	Godkänd av - datum	Generell tolerans ISO 2768	Generell ytfjällhet Ra	Vyplacering	Skala
MA & ML			m	6.4		1:1
 MÄLARDALENS HÖGSKOLA ESKILSTUNA VÄSTERÅS		Riftningsnummer	Artikel / modellnamn			
		2016-305-3101	2016-305-3001			
		Titel/Benämning	Utgåva		Blad	
		L-Järn			1(1)	



Vikt: 4172.67g

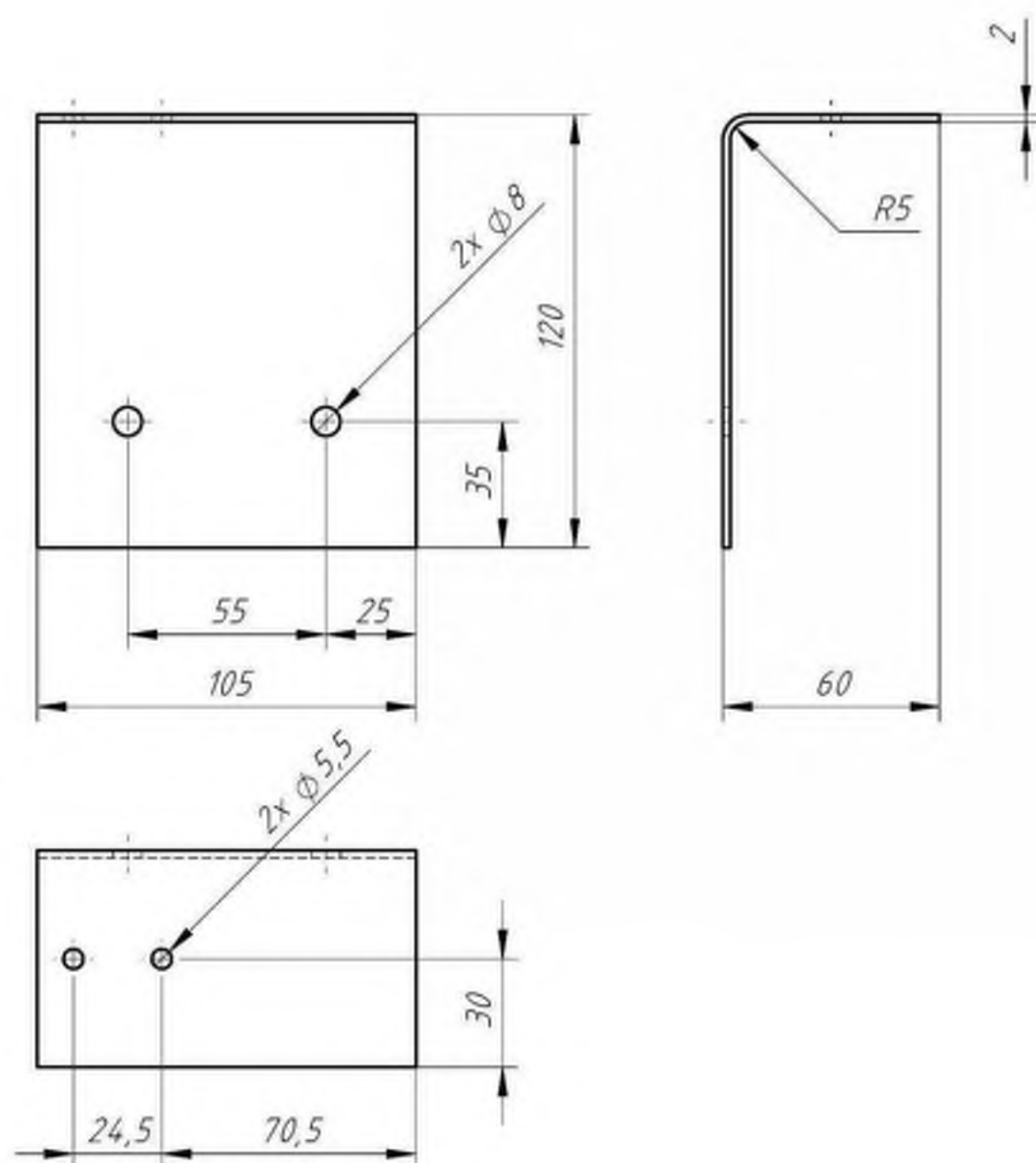
Skarpa kanter brutna.

[illegible]



Vikt: 362.68g

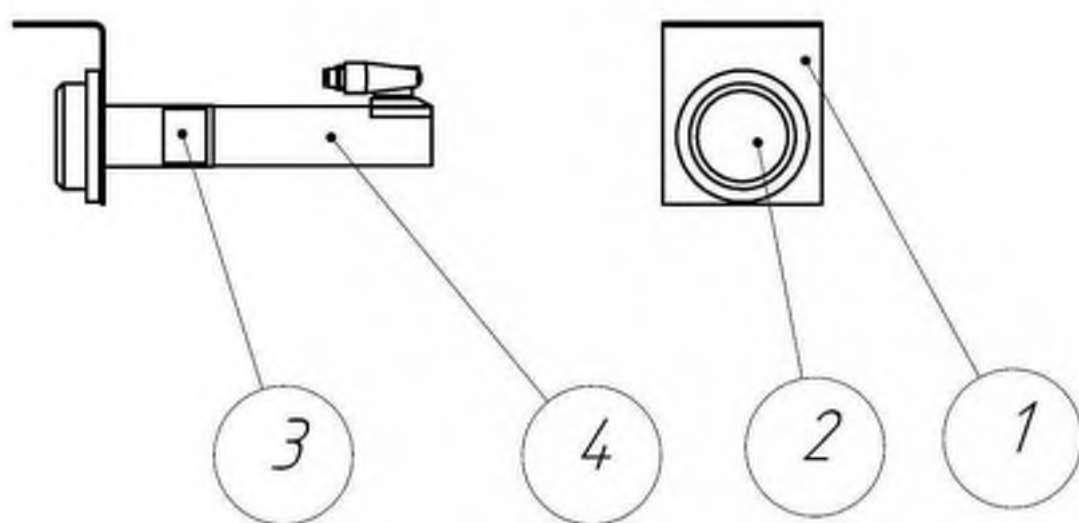
2	2		Lyftab_Nylonhjul_Typ82_7 93714	37.76
1	1	Upphängning	2016-305-4001	287.16
Pos nr	Antal	Beskrivning	Artikelnummer	Vikt
Konstruerad av MA & ML	Granskad av	Godkänd av - datum	Generell tolerans ISO 2768	Generell ytjämnhet Ra
 MÄLARDALENS HÖGSKOLA ESKILSTUNA VÅSTERÅS		Riftningsnummer 2016-305-4100	Artikel / modellnamn 2016-305-4000	
		Titel/Benämning Vagn stödskena utan drivning	Utgåva	Blad 1(1)



Vikt: 287.16g

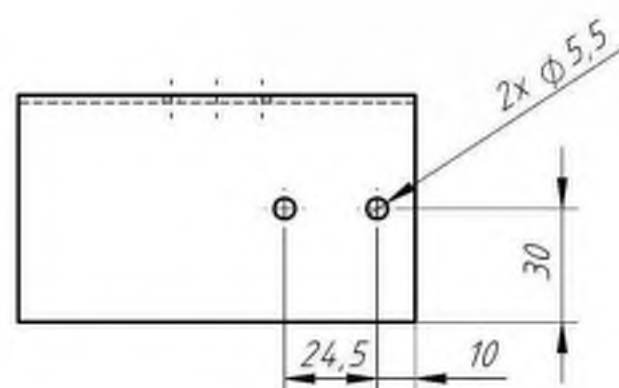
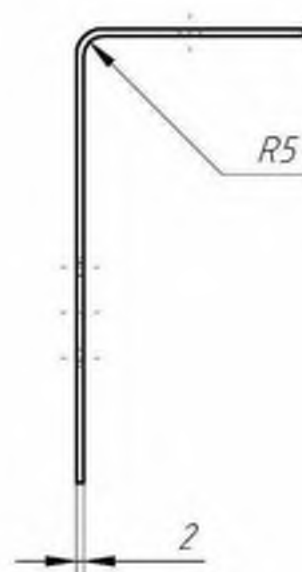
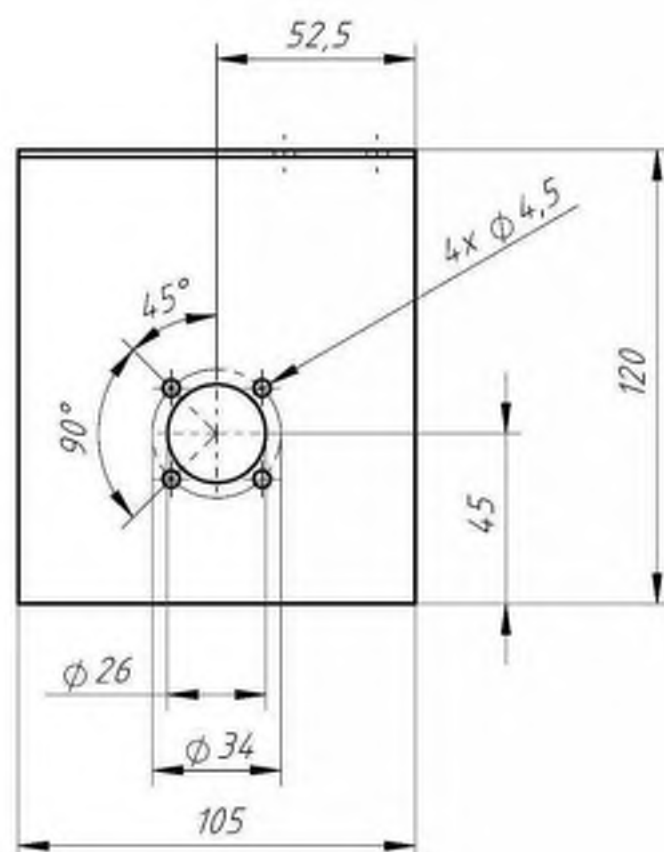
Skarpa kanter brutna.

Material 1023 Carbon Steel Sheet (SS)			Dimension / kommentar			
Konstruerad av MA & ML	Granskad av	Godkänd av - datum	Generell tolerans ISO 2768 m	Generell yttjämnhet Ra 6.4	Vyplacering 	Skala 1:2
 MÄLARDALENS HÖGSKOLA ESKILSTUNA VÄSTERÅS			Riftningsnummer 2016-305-4101		Artikel / modellnamn 2016-305-4001	
			Titel/Benämning Upphängning			Blad 1(1)



Vikt: 1505.57g

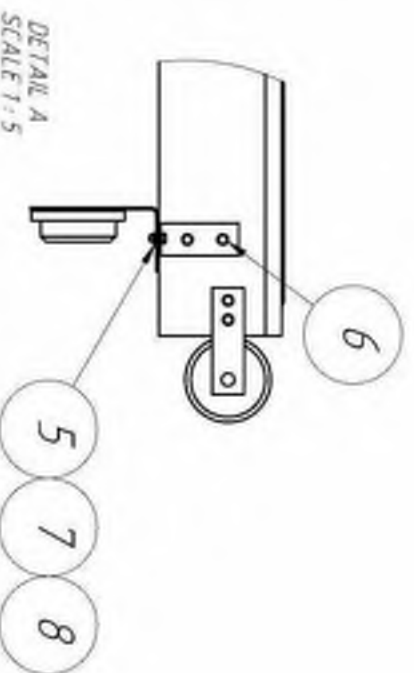
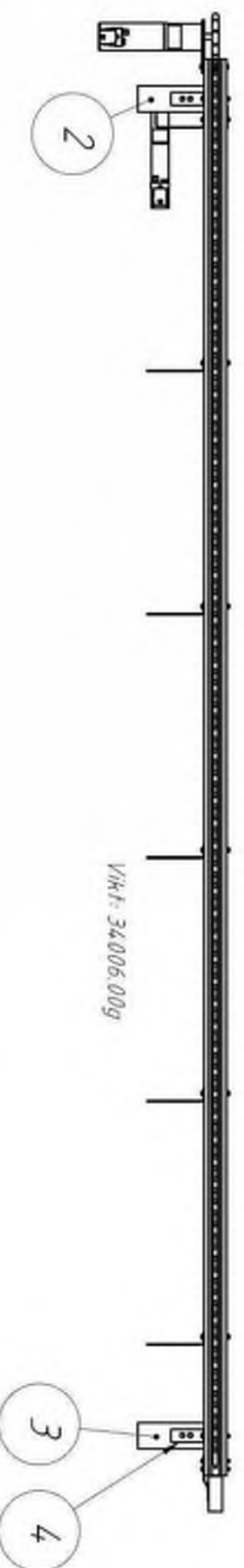
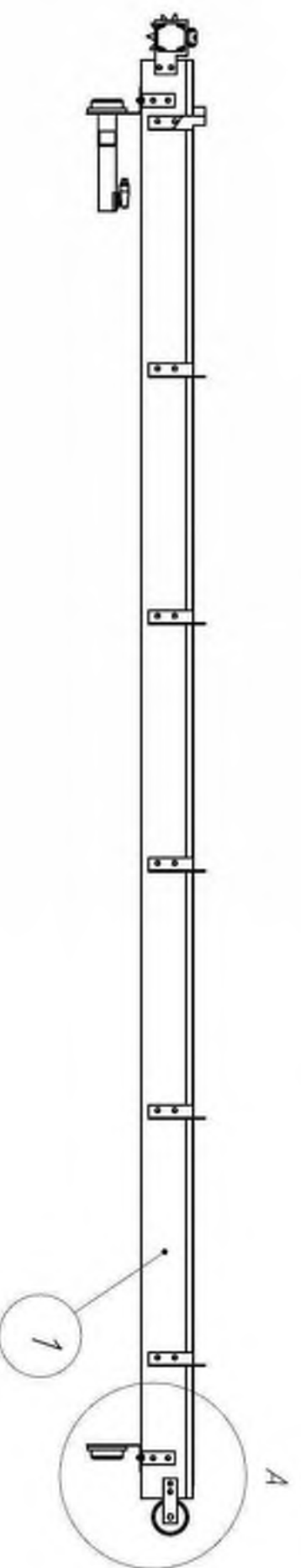
4	1	Servomotor	Festo_EMME-AS-40-M-LV-ASB	850.00
3	1	Växellåda	Festo_EMGA-40-P-G5-EAS-40	350.00
2	1		Lyftab_Flanshjul_789100	750.00
1	1	Upphängning	2016-305-5001	279.39
Pos nr	Antal	Beskrivning	Artikelnummer	Vikt
Konstruerad av MA & ML	Granskad av	Godkänd av - datum	Generell tolerans ISO 2768	Generell yttjämnhet Ra
 MÄLARDALENS HÖGSKOLA ESKILSTUNA VÄSTERÅS		Riftningsnummer 2016-305-5100	Artikel / modellnamn 2016-305-5000	
		Titel/Benämning Vagn stödskena med drivning	Utgåva	Blad 1(1)



Vikt: 279.39g

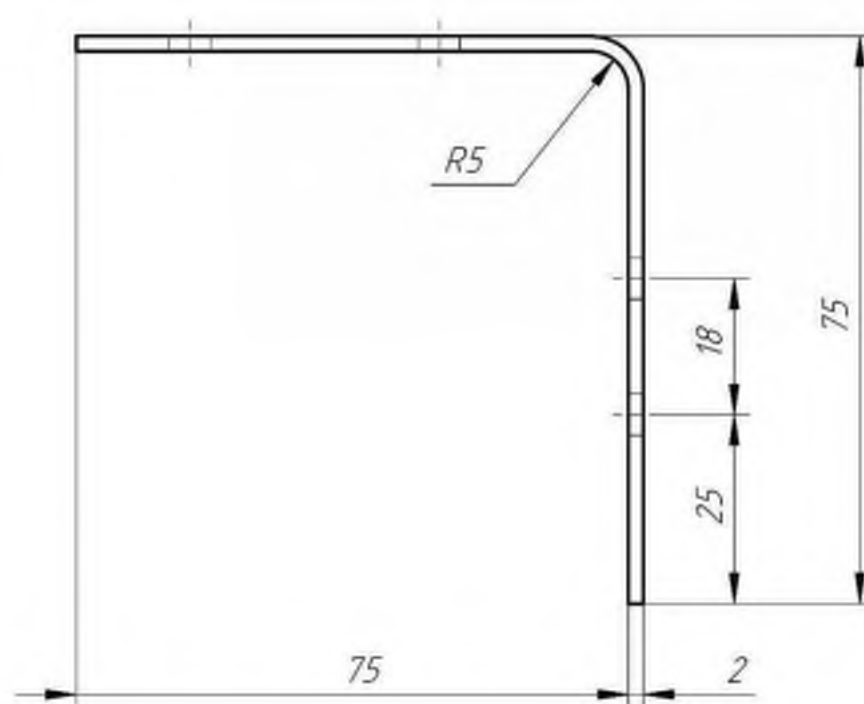
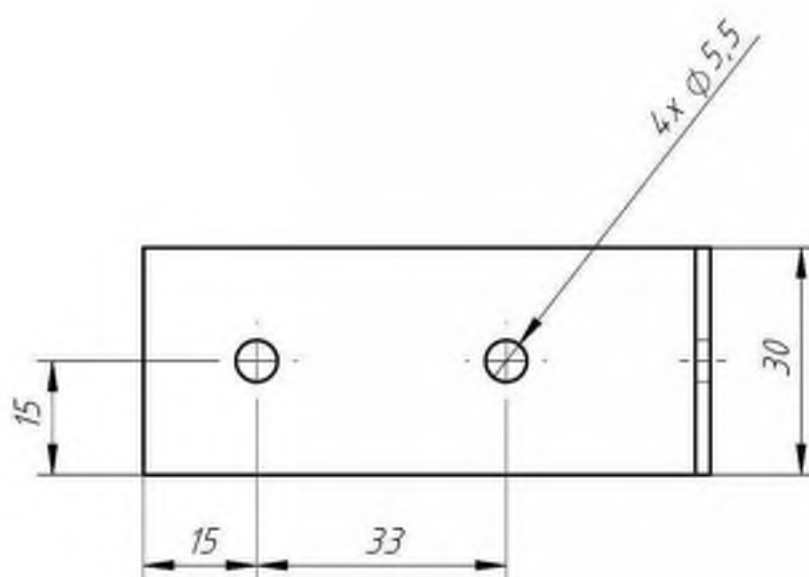
Skarpa kanter brutna.

Material		Dimension / kommentar				
1023 Carbon Steel Sheet (SS)						
Konstruerad av	Granskad av	Godkänd av - datum	Generell tolerans ISO 2768	Generell yttjämnhet Ra	Vyplacering	Skala
MA & ML			m	6.4		1:2
		Riftningsnummer	Artikel / modellnamn			
		2016-305-5101	2016-305-5001			
		Titel/Benämning	Utgåva		Blad	
		Upphängning			1(1)	



DETAIL A
SCALE 1:5

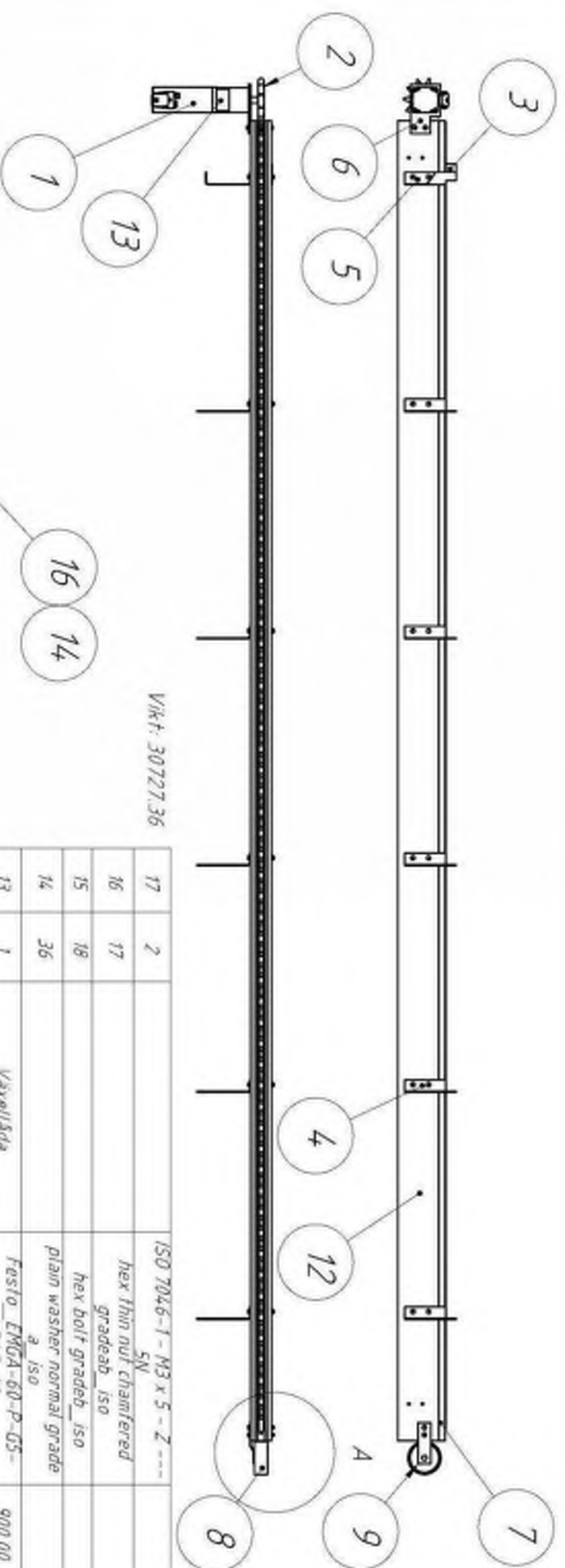
[illegible]



Vikt: 67.07g

Skarpa kanter brutna.

Material 1023 Carbon Steel Sheet (SS)			Dimension / kommentar			
Konstruerad av MA & ML	Granskad av	Godkänd av - datum	Generell tolerans ISO 2768 m	Generell yttjämnhet Ra 6.4	Vyplacering 	Skala 1:1
 MÄLARDALENS HÖGSKOLA ESKILSTUNA VÄSTERÅS			Riftningsnummer 2016-305-6101		Artikel / modellnamn 2016-305-6001	
			Titel/Benämning L-Järn			Utgåva 1(1)



VKR: 30727.36

17	2	ISO 7046-1 - M3 x 5 - Z - - -	
16	17	hex thin nut chamfered gradeab_iso	
15	18	hex bolt gradeb_iso	
14	36	plain washer normal grade a_iso	
13	1	Festo_EMOA-60-P-G5- EAS-60	900.00
12	1	VKR100	21466.53
11	1	Transportkedja	2944.00
10	2	ISO 7046-1 - M3 x 6 - Z - - -	
9	1	Hjulfäste	45.69
8	1	Nylonhjul	111.72
7	2	Glidskena	993.46
6	1	Motorfäste	244.89
5	1	Konsol höger med stopp	198.28
4	5	Konsol höger	196.37
3	1	Stopp	85.69
2	1	Cham wheel ISO - 112 16A-1 --TISA14, 0N	
1	1	Servomotor	1650.00
17	2	ISO 7046-1 - M3 x 5 - Z - - -	
16	17	hex thin nut chamfered gradeab_iso	
15	18	hex bolt gradeb_iso	
14	36	plain washer normal grade a_iso	
13	1	Festo_EMOA-60-P-G5- EAS-60	900.00
12	1	VKR100	21466.53
11	1	Transportkedja	2944.00
10	2	ISO 7046-1 - M3 x 6 - Z - - -	
9	1	Hjulfäste	45.69
8	1	Nylonhjul	111.72
7	2	Glidskena	993.46
6	1	Motorfäste	244.89
5	1	Konsol höger med stopp	198.28
4	5	Konsol höger	196.37
3	1	Stopp	85.69
2	1	Cham wheel ISO - 112 16A-1 --TISA14, 0N	
1	1	Servomotor	1650.00
17	2	ISO 7046-1 - M3 x 5 - Z - - -	
16	17	hex thin nut chamfered gradeab_iso	
15	18	hex bolt gradeb_iso	
14	36	plain washer normal grade a_iso	
13	1	Festo_EMOA-60-P-G5- EAS-60	900.00
12	1	VKR100	21466.53
11	1	Transportkedja	2944.00
10	2	ISO 7046-1 - M3 x 6 - Z - - -	
9	1	Hjulfäste	45.69
8	1	Nylonhjul	111.72
7	2	Glidskena	993.46
6	1	Motorfäste	244.89
5	1	Konsol höger med stopp	198.28
4	5	Konsol höger	196.37
3	1	Stopp	85.69
2	1	Cham wheel ISO - 112 16A-1 --TISA14, 0N	
1	1	Servomotor	1650.00
17	2	ISO 7046-1 - M3 x 5 - Z - - -	
16	17	hex thin nut chamfered gradeab_iso	
15	18	hex bolt gradeb_iso	
14	36	plain washer normal grade a_iso	
13	1	Festo_EMOA-60-P-G5- EAS-60	900.00
12	1	VKR100	21466.53
11	1	Transportkedja	2944.00
10	2	ISO 7046-1 - M3 x 6 - Z - - -	
9	1	Hjulfäste	45.69
8	1	Nylonhjul	111.72
7	2	Glidskena	993.46
6	1	Motorfäste	244.89
5	1	Konsol höger med stopp	198.28
4	5	Konsol höger	196.37
3	1	Stopp	85.69
2	1	Cham wheel ISO - 112 16A-1 --TISA14, 0N	
1	1	Servomotor	1650.00

DETAIL A
SCALE 1:2

MILANOLINI NISSAN
ESCLUSIVA RISTRETTE

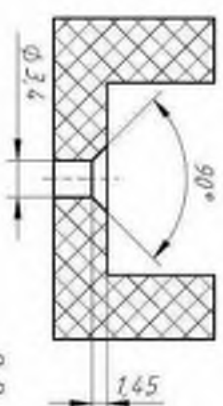
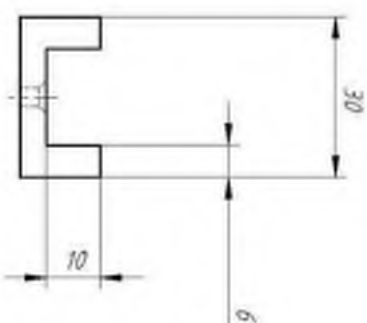
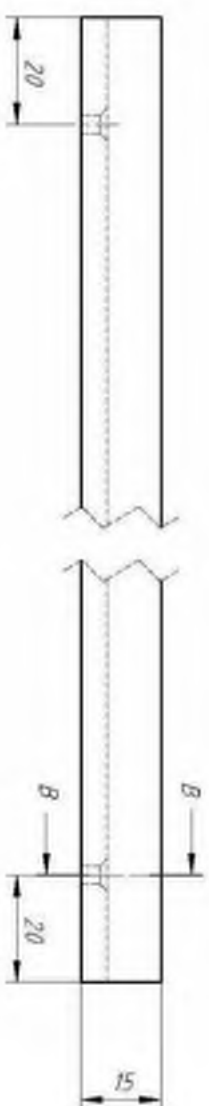


2016-305-7100

Kedjetransportör höger

2016-305-7000

1 (1)



B-B
SCALE 2:1

Vágt: 993,46g

Nylon 101

MA 8 ML



NATIONAL INSTITUTE OF
STANDARDS AND TECHNOLOGY

2016-305-7101

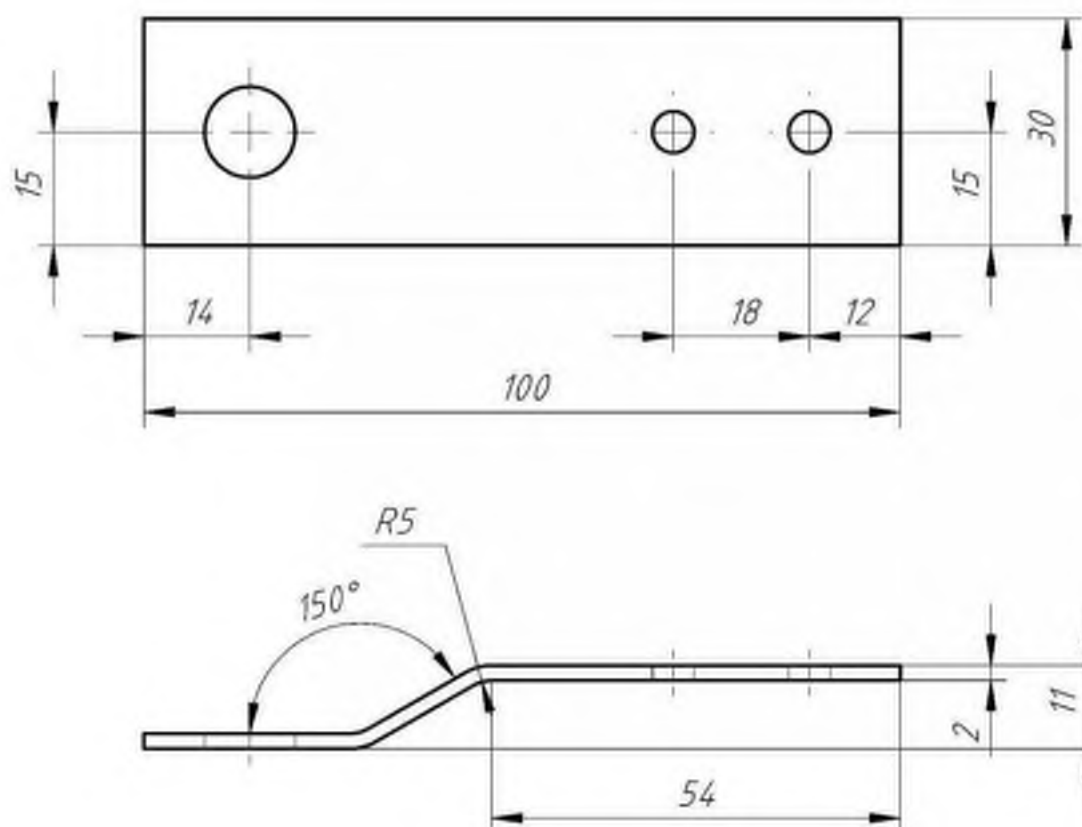
Grindstone

3.2

3.2

1/1

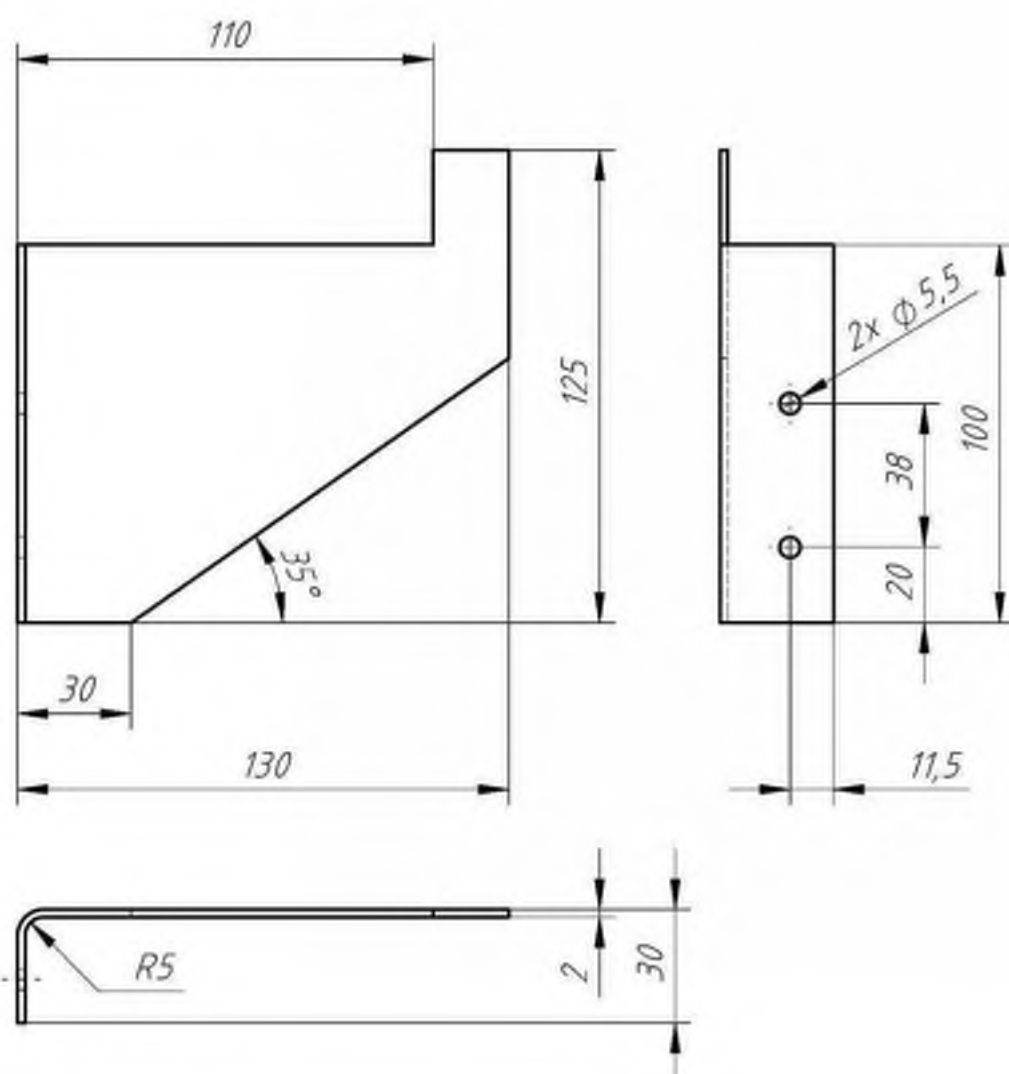
1/1



Vikt: 45.69g

Skarpa kanter brutna.

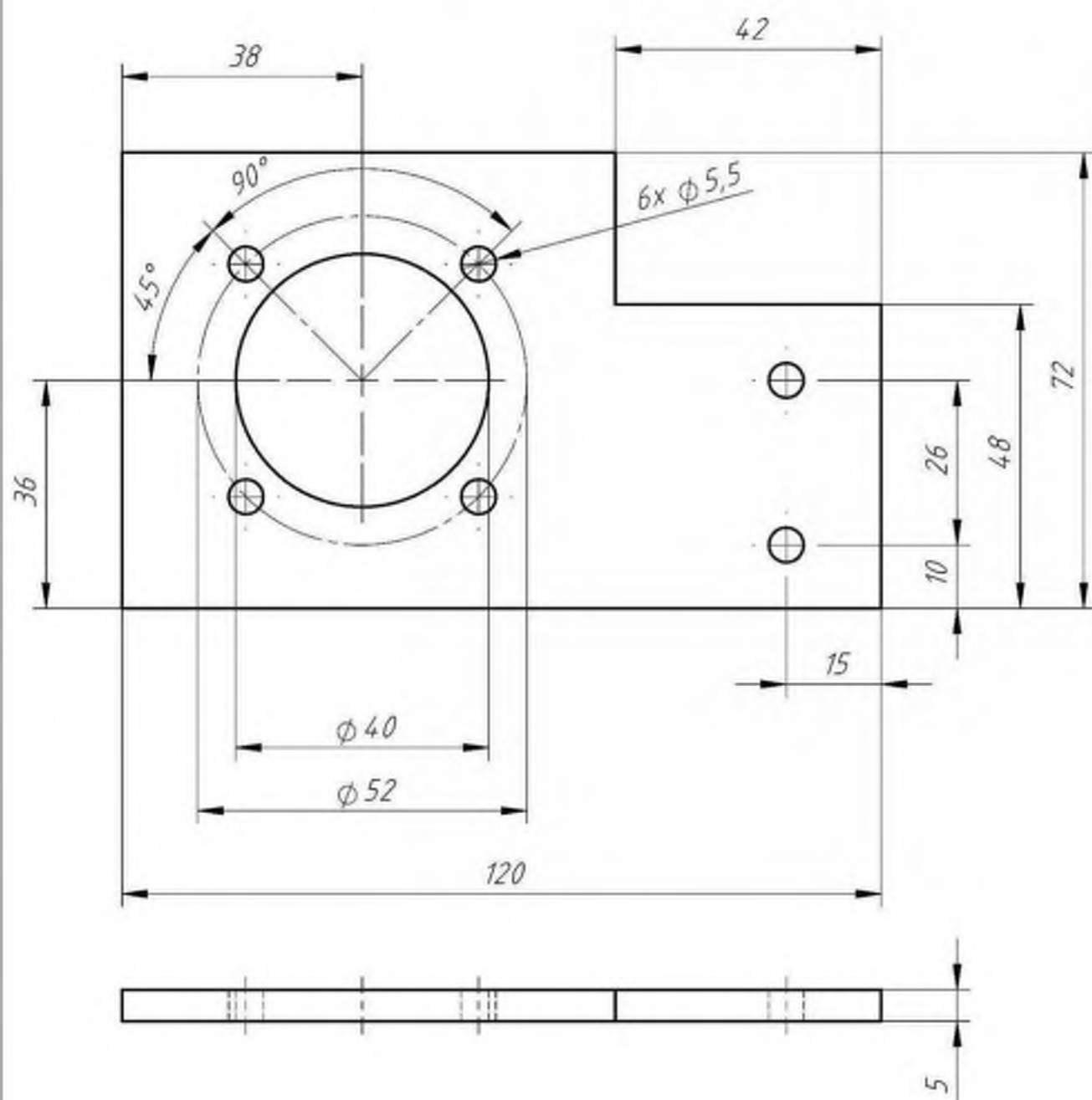
Material		Dimension / kommentar				
1023 Carbon Steel Sheet (SS)						
Konstruerad av	Granskad av	Godkänd av - datum	Generell tolerans ISO 2768	Generell yttjämnhet Ra	Vyplacering	Skala
MA & ML			m	6.4		1:1
 MÄLARDALENS HÖGSKOLA ESKILSTUNA VÄSTERÅS		Riftningsnummer		Artikel / modellnamn		
		2016-305-7102		2016-305-7002		
		Titel/Benämning			Utgåva	Blad
		Hjulfäste				1(1)



Vikt: 196.37g

Skarpa kanter brutna.

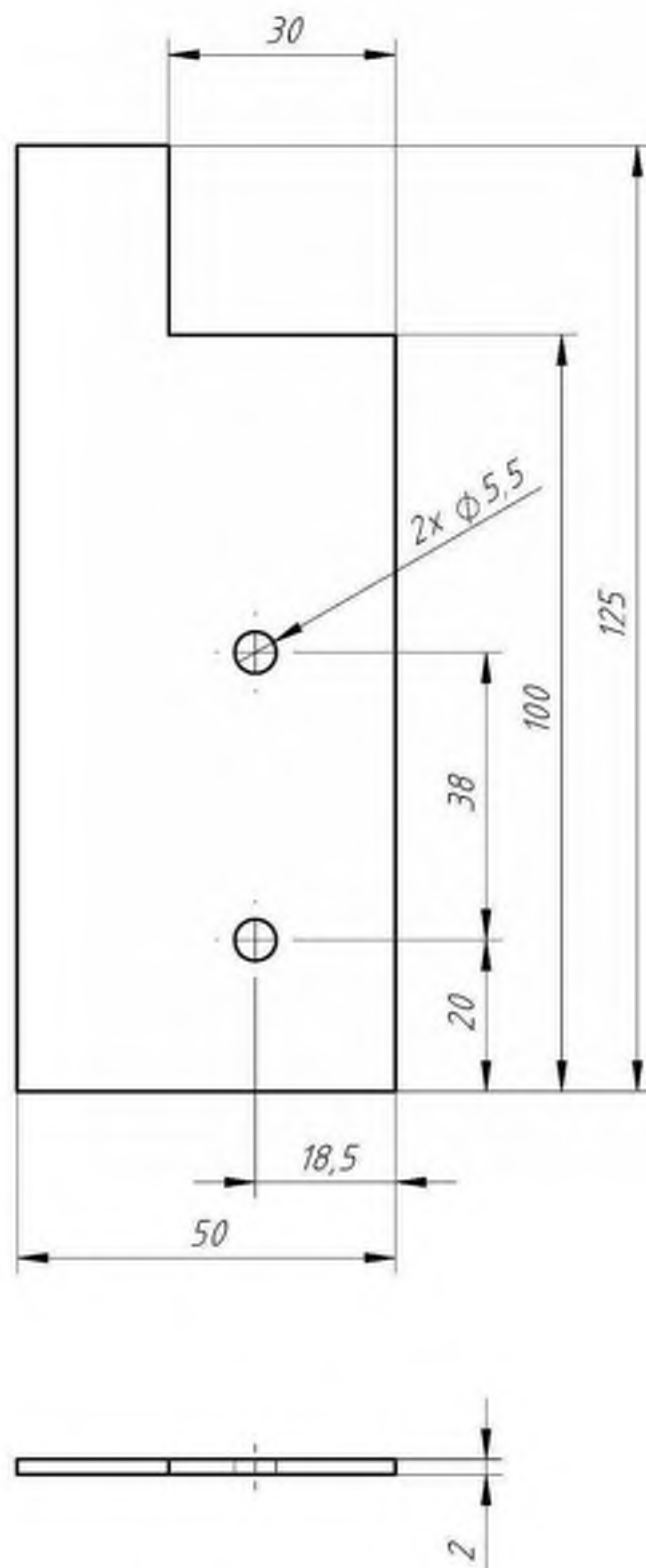
Material		Dimension / kommentar				
1023 Carbon Steel Sheet (SS)						
Konstruerad av	Granskad av	Godkänd av - datum	Generell tolerans ISO 2768	Generell yttjämnhet Ra	Vyplacering	Skala
MA & ML			m	6.4		1:2
		Ritningsnummer	Artikel / modellnamn			
		2016-305-7103	2016-305-7003			
		Titel/Benämning			Utgåva	Blad
		Konsol höger				1(1)



Vikt: 244.89g

Skarpa kanter brutna.

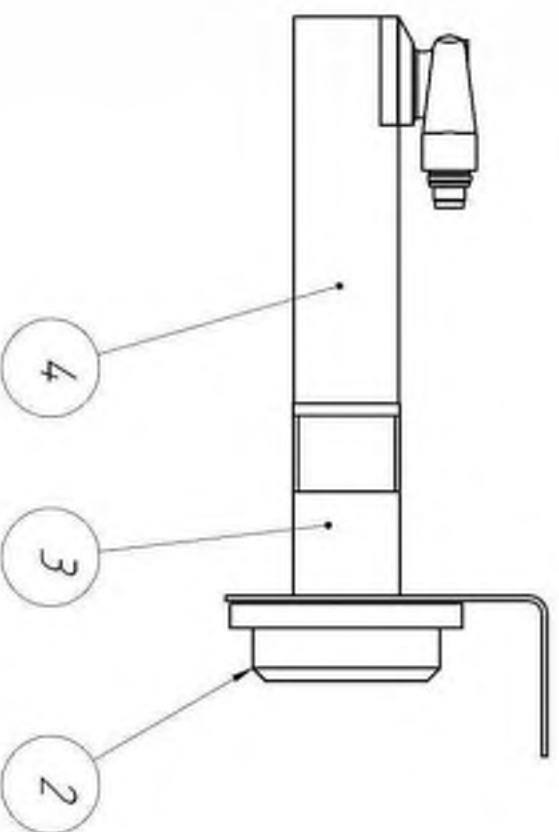
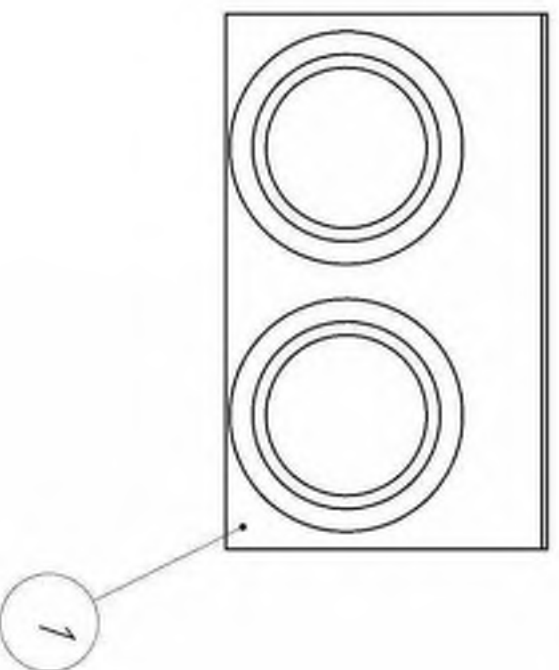
Material		Dimension / kommentar					
1023 Carbon Steel Sheet (SS)							
Konstruerad av	Granskad av	Godkänd av - datum	Generell tolerans	Generell ytjämnhet	Vyplacering	Skala	
MA & ML			ISO 2768 m	Ra 6.4		1:1	
 MÄLARDALENS HÖGSKOLA ESKILSTUNA VÄSTERÅS		Riftningsnummer			Artikel / modellnamn		
		2016-305-7105			2016-305-7005		
Titel/Benämning					Utgåva	Blad	
Motorfäste						1(1)	



Vikt: 85.69g

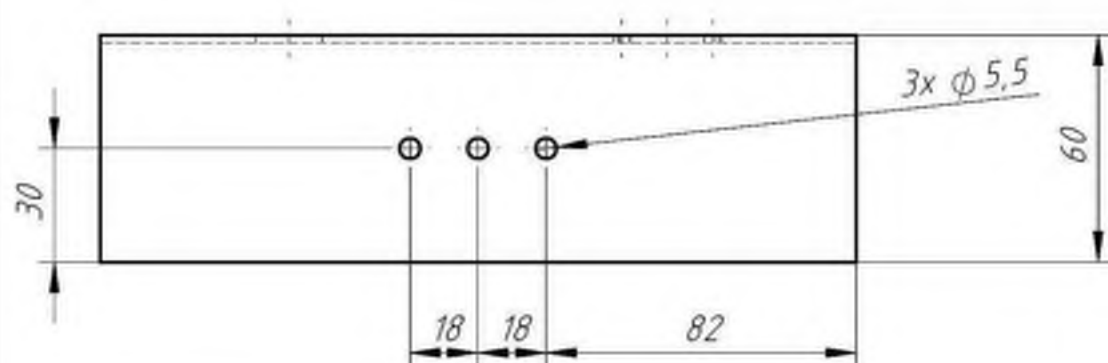
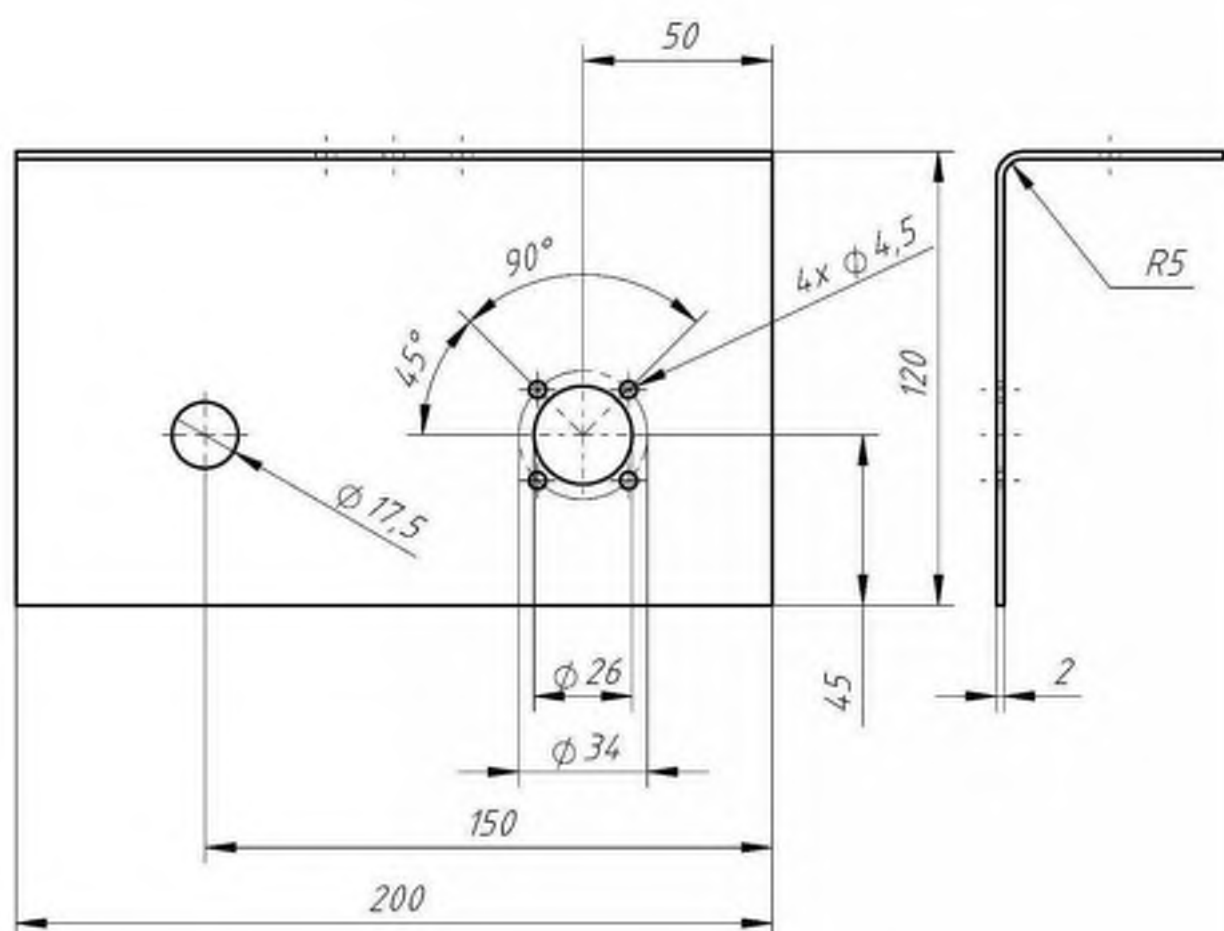
Skarpa kanter brutna

Material 1023 Carbon Steel Sheet (SS)			Dimension / kommentar			
Konstruerad av MA & ML	Granskad av	Godkänd av - datum	Generell tolerans ISO 2768 m	Generell yttjämnhet Ra 6.4	Vyplacering 	Skala 1:1
 MÄLARDALENS HÖGSKOLA ESKILSTUNA VÄSTERÅS			Riftningsnummer 2016-305-7106		Artikel / modellnamn 2016-305-7006	
			Titel/Benämning Stopp			Utgåva 1(1)



Vikt: 2663,77g

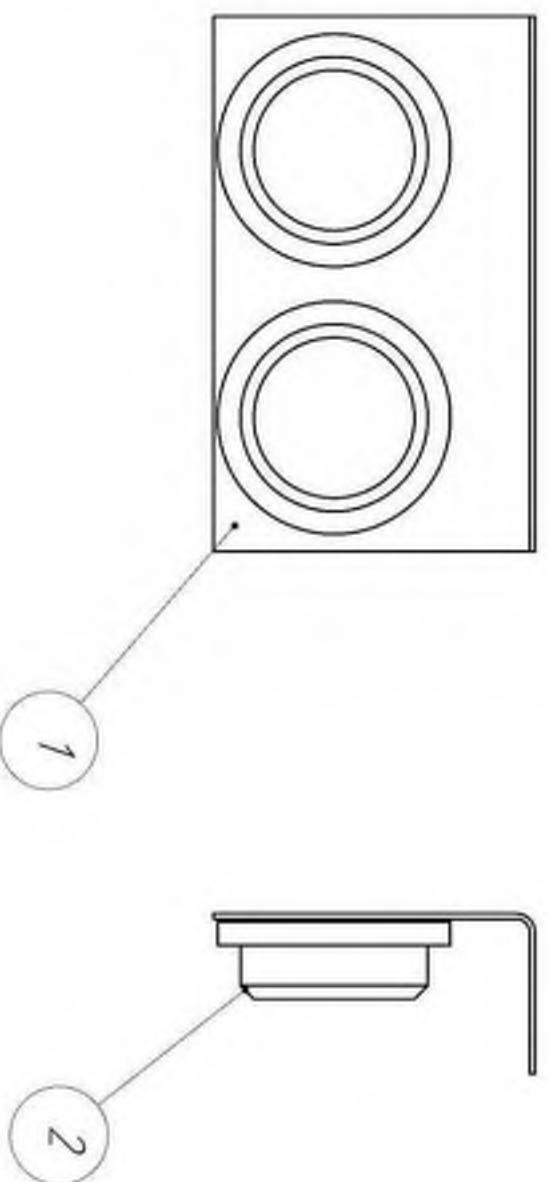
4	1	Servomotor	Festo_ENME-AS-40-M-LV-ASB	850,00
3	1	Växellåda	Festo_ENGA-40-P-05-EAS-40	350,00
2	2		Ljftad_Flanshjul_789100	750,00
1	1	Upphängning	2016-305-8001	537,15
Festo	ASB	Best.nr	ASB-kod	Wäl
MA & ME	Varuslag av	Produkt av - datum	Varuslag av - datum	Wäl
		2016-305-8100	2016-305-8000	Wäl
		Vagn kedjetransportör med drivning		Wäl
				Wäl



Vikt: 537.15g

Skarpa kanter brutna.

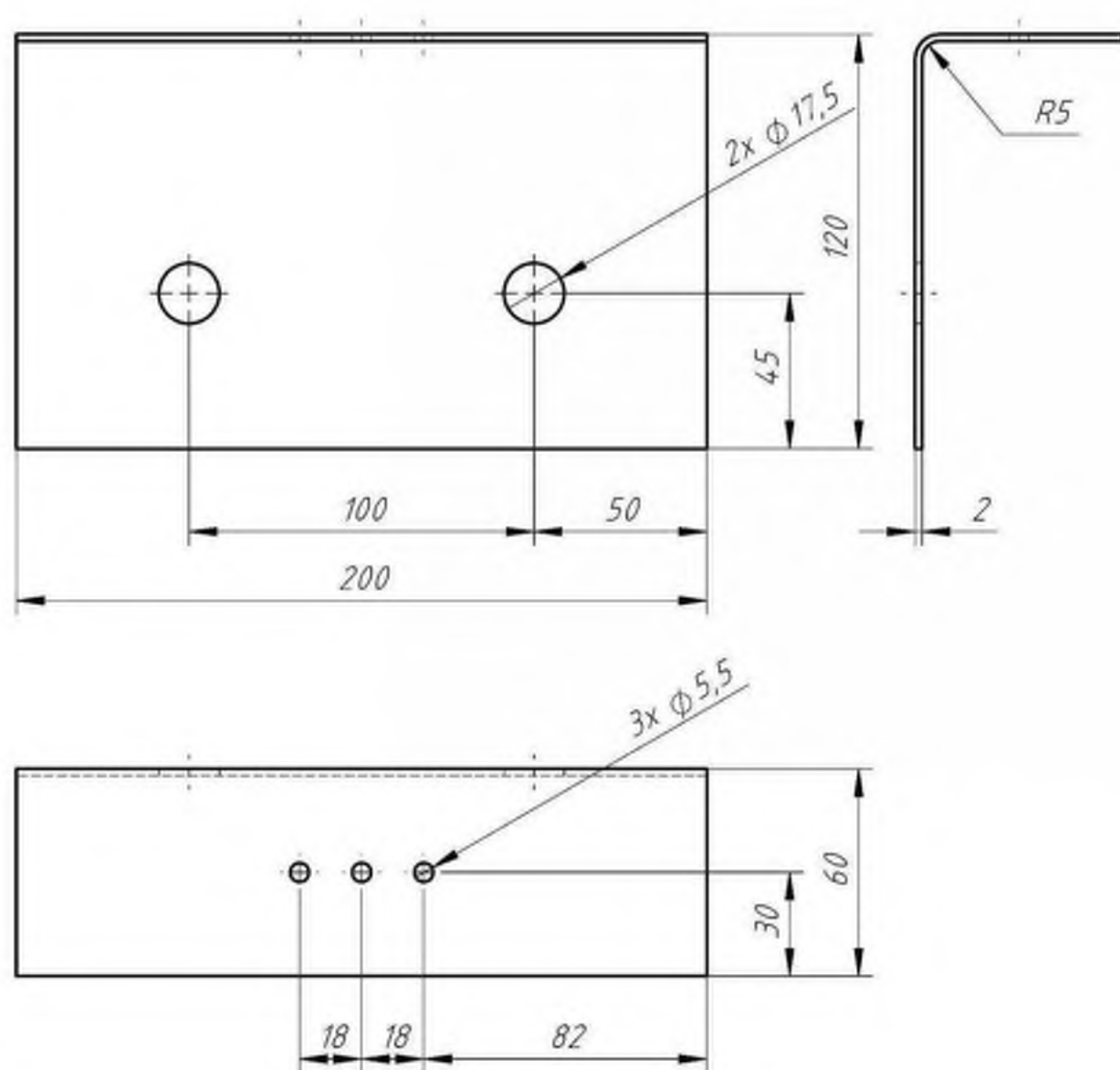
Material		Dimension / kommentar					
1023 Carbon Steel Sheet (SS)							
Konstruerad av	Granskad av	Godkänd av - datum	Generell tolerans	Generell ytjämnhet	Vysplacering	Skala	
MA & ML			m	6.4		1:2	
 MÄLARDALENS HÖGSKOLA ESKILSTUNA VÄSTERÅS		Riftningsnummer			Artikel / modelinamn		
		2016-305-8101			2016-305-8001		
		Titel/Benämning			Utgåva		Blad
		Upphängning					1(1)



Vikt: 2042,71g

Skarpa kanter brufta.

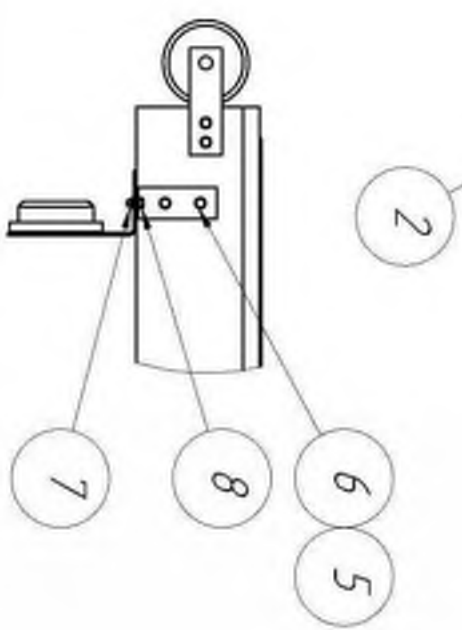
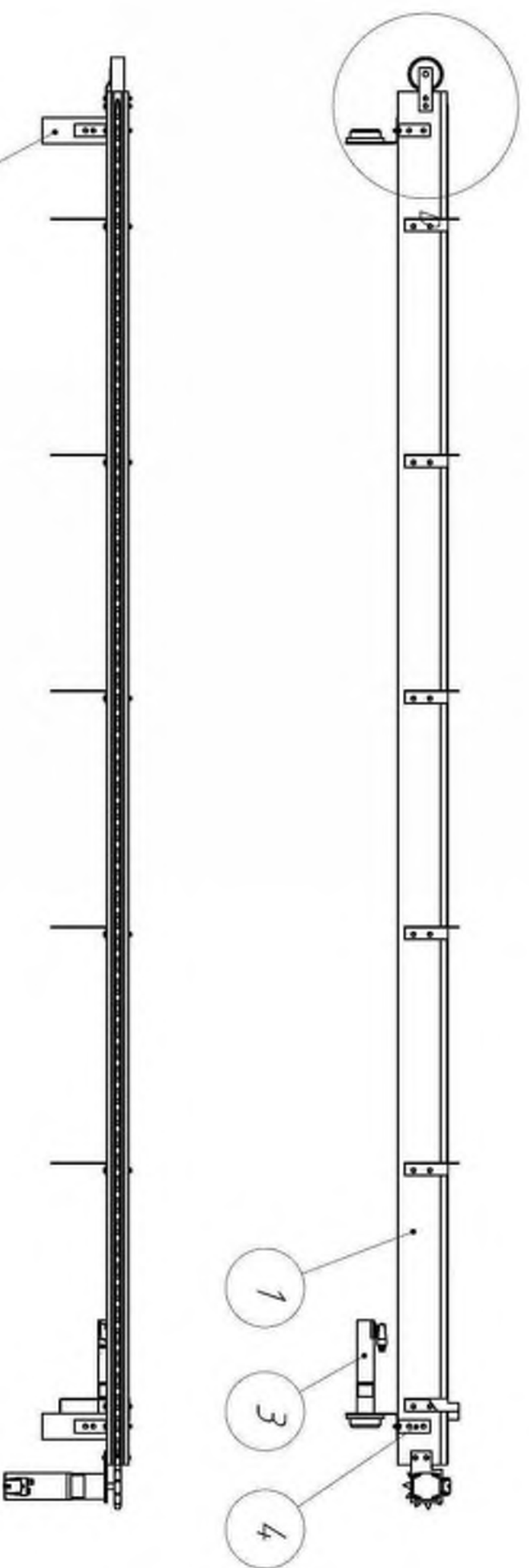
2	2		Lyftab_Flanshjul_789100	750,00
1	1	Upphängning	2016-305-9001	542,71
Passer	ANVÄ	Beskrivning	Artikelnamn	VIN
MA & ML		Produkt nr - 10201	Specifikationer	Vikt
		2016-305-9100	2016-305-9000	1,2
				
		MILANOLINI RÖSSANLA ESKILSTUNA RÅSTERS		
		Vagn kedjetransportör utan drivning		
		1 (11)		



Vikt: 542.71g

Skarpa kanter brutna.

Material		Dimension / kommentar				
1023 Carbon Steel Sheet (SS)						
Konstruerad av	Granskad av	Godkänd av - datum	Generell tolerans ISO 2768	Generell yttjämnhet Ra	Vyplacering	Skala
MA & ML			m	6.4		1:2
 MÄLARDALENS HÖGSKOLA ESKILSTUNA VÄSTERÅS		Riftningsnummer		Artikel / modellnamn		
		2016-305-9101		2016-305-9001		
		Titel/Benämning			Utgåva	Blad
		Upphängning				1(1)



Vikt: 34.006,00g

8	4	hex bolt gradeb_ iso	
7	8	hex thin nut chamfered gradeab_ iso	
6	4	hex bolt gradeb_ iso	
5	16	plain washer normal grade a_ iso	
4	2	L-järn	2016-305-6001
3	1	Vagn kedjetransportör med drivning	2016-305-8000
2	1	Vagn kedjetransportör utan drivning	2016-305-9000
1	1	Kedjetransportör V	2016-305-10000
Pos nr	Artikl	Beställning	Artikelnr
MA & ML	Artikl nr	Beställning	Artikelnr

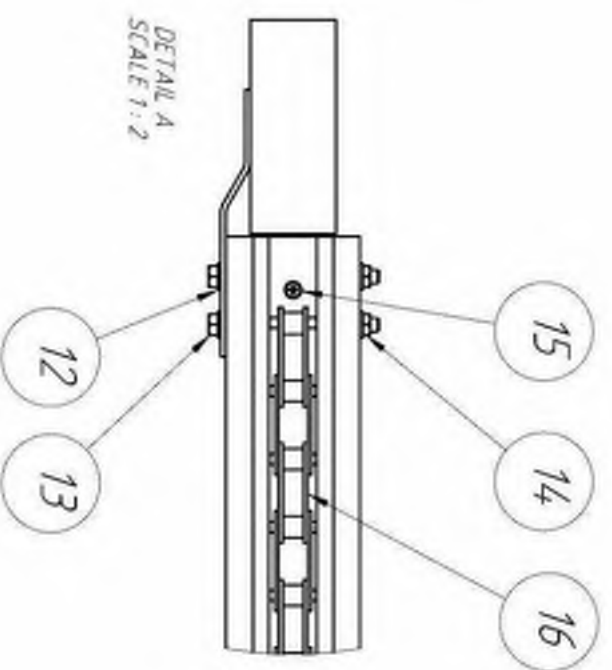
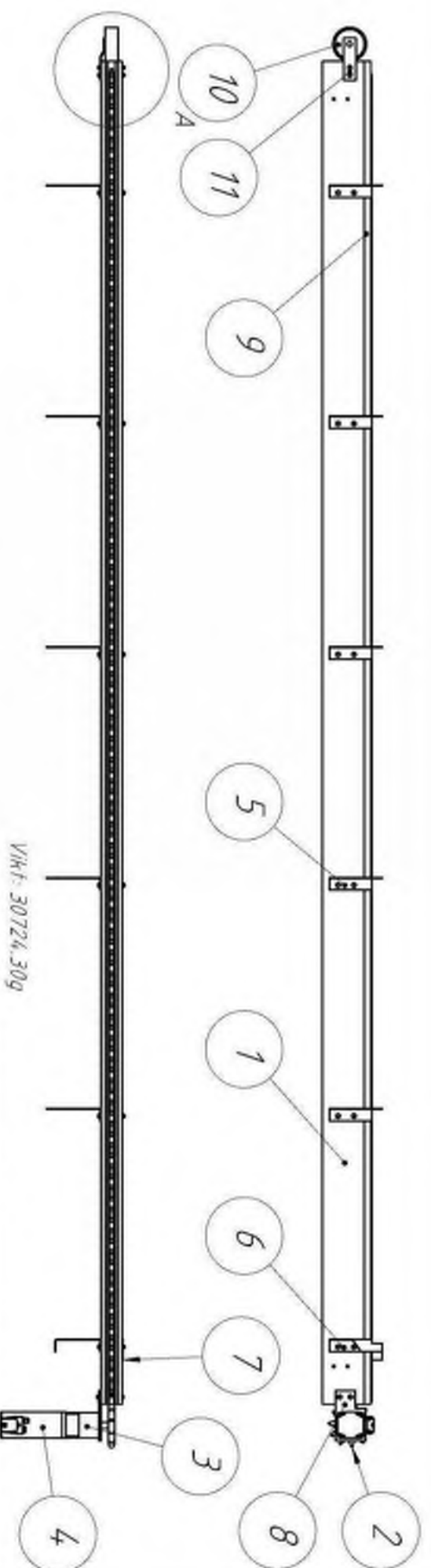
2016-305-10100	2016-305-10000

MA & ML	Artikl nr	Beställning	Artikelnr
MA & ML	Artikl nr	Beställning	Artikelnr

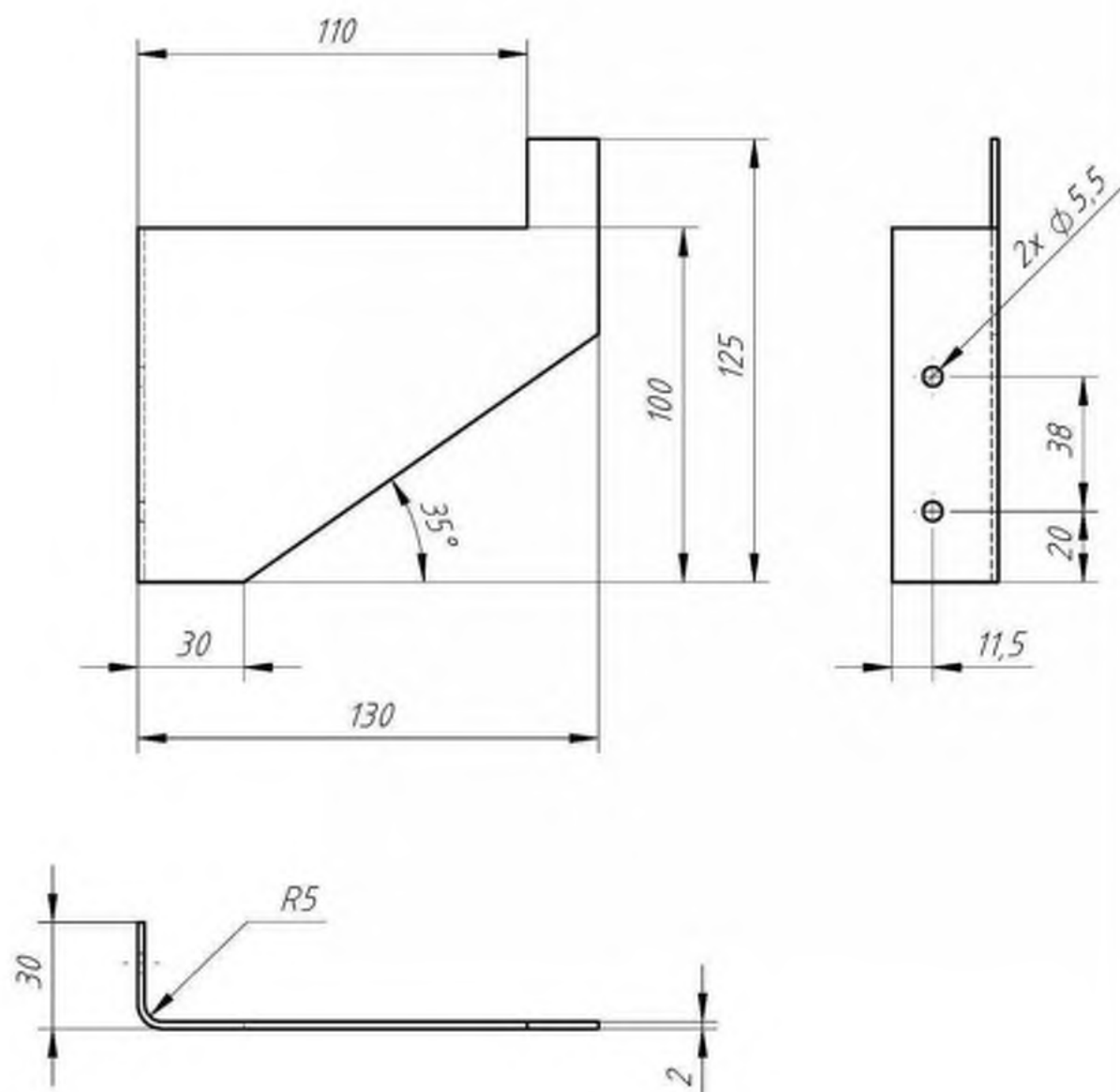


Kedjetransportör V med vagnar

1 (1)



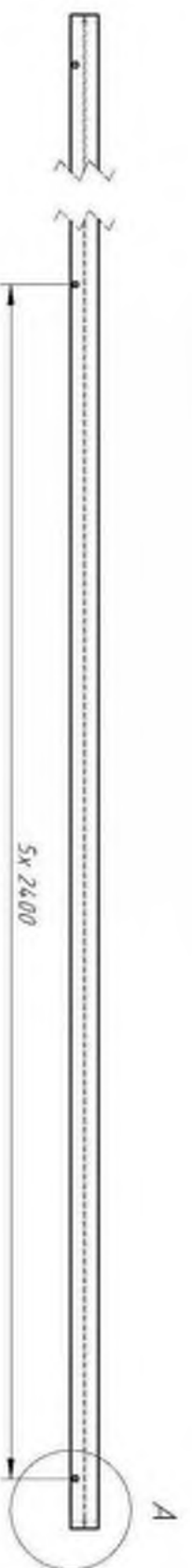
16	1	lwis transportkedja	lwis_C2040HP	2944,00
15	4		ISO 7046-1 - M3 x 6 - Z --- 6N	
14	16		hex thin nut chamfered gradeab_iso	
13	16		hex bolt gradeb_iso	
12	32		plain washer normal grade g_iso	
11	1	Hydrauliske	2016-305-7002	45,69
10	1	Nylonhjul	Lyftab_typ82_762513	111,72
9	2	Glidskena	2016-305-7001	993,46
8	1	Motorflästa	2016-305-7005	244,89
7	1	Stopp	2016-305-7006	85,69
6	1	Konsol V med stopp	2016-305-11002	198,28
5	5	Konsol Vanster	2016-305-11001	196,37
4	1	Festo servomotor	Festo_EMME-AS-60-S-LS- ASB	1650,00
3	1	Festo växelåda	Festo_FMG4-60-P-G5- EAS-60	900,00
2	1		Chain wheel ISO - 112 16A-1 ---11SA14,0N	
1	1		VKR100	21466,53
Positiv	Arvid	3-aktig	Arvidsmärke	Y&H
Varuslag nr 1	Varuslag nr 2	Varuslag nr 3	Varuslag nr 4	Varuslag nr 5
MA & ML				



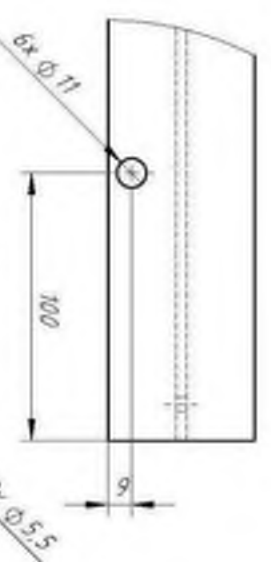
Vikt: 196.37g

Skarpa kanter brutna.

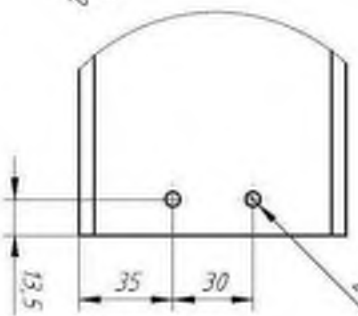
Material		Dimension / kommentar				
1023 Carbon Steel Sheet (SS)						
Konstruerad av	Granskad av	Godkänd av - datum	Generell tolerans ISO 2768	Generell yttjämnhet Ra	Vyplacering	Skala
MA & ML			m	6.4		1:2
		Riftningsnummer	Artikel / modellnamn			
		2016-305-11101	2016-305-11001			
		Titel/Benämning	Utgåva			Blad
		Konsol Vänster				1(1)



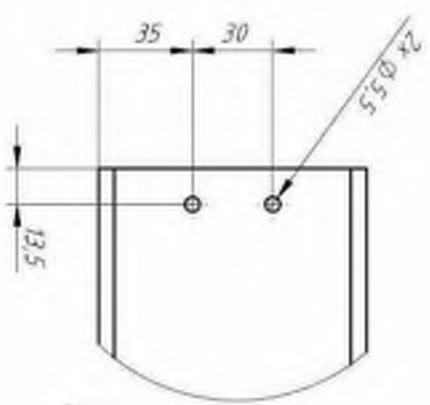
DETAIL A
SCALE 1:2



DETAIL B
SCALE 1:2

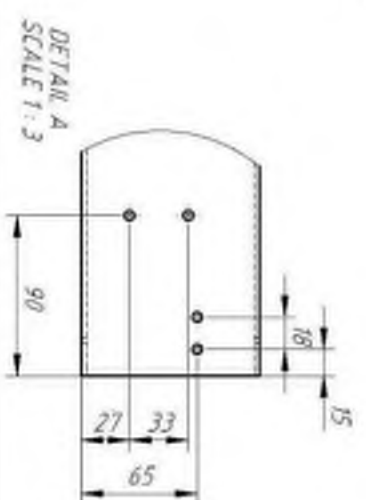
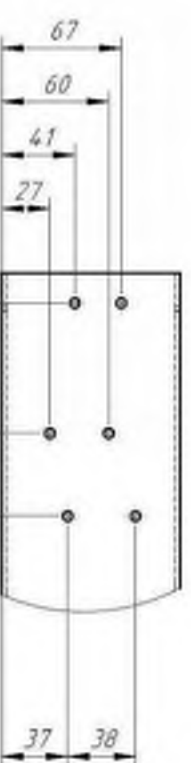
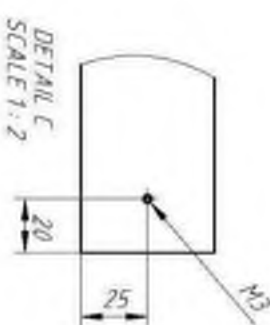
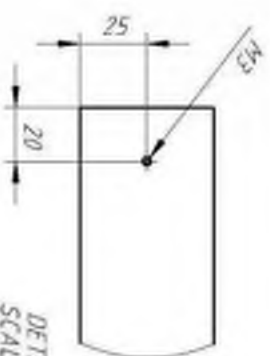
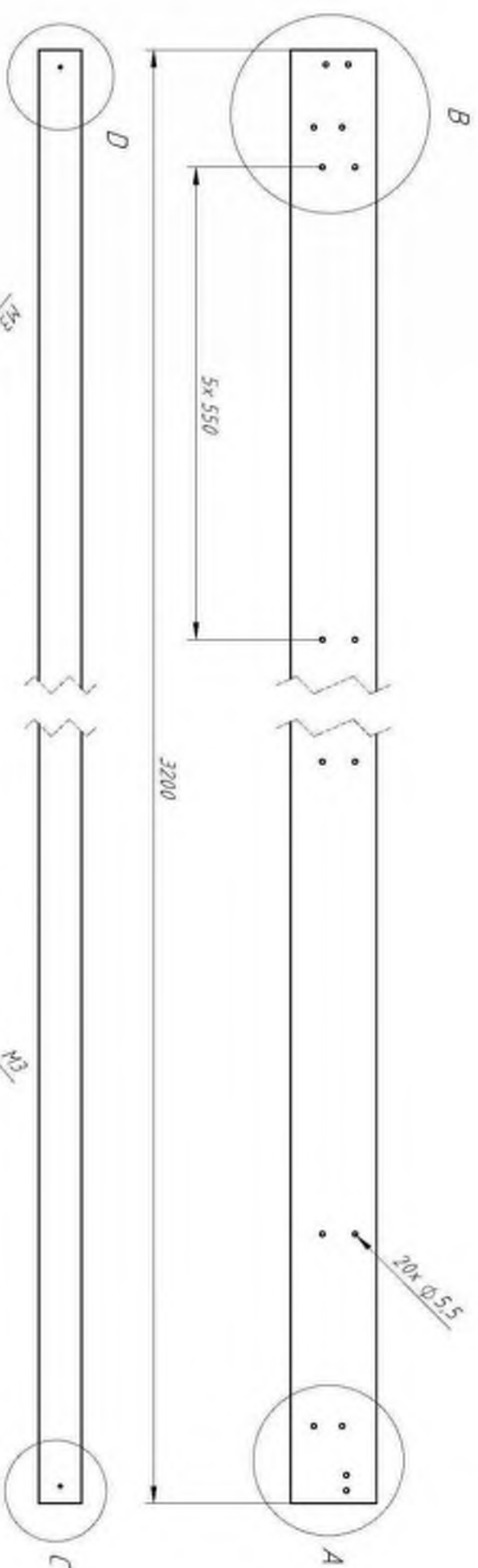


DETAIL C
SCALE 1:2



Vík: 98938.00g

Projekt: 01-01	Objekt: 01-01	Stavba: 01-01	Město: 01-01
MA & ML	IPE 100	IPE 100	IPE 100
MILANOVA	IPE 100	IPE 100	IPE 100
MILANOVA	IPE 100	IPE 100	IPE 100
MILANOVA	IPE 100	IPE 100	IPE 100
MILANOVA	IPE 100	IPE 100	IPE 100
MILANOVA	IPE 100	IPE 100	IPE 100



VKh: 21466,53g

Исполнитель: MA & ML	Исполнитель: VKR100	Исполнитель: VKR100	Исполнитель: VKR100
Исполнитель: VKR100	Исполнитель: VKR100	Исполнитель: VKR100	Исполнитель: VKR100
Исполнитель: VKR100	Исполнитель: VKR100	Исполнитель: VKR100	Исполнитель: VKR100
Исполнитель: VKR100	Исполнитель: VKR100	Исполнитель: VKR100	Исполнитель: VKR100
Исполнитель: VKR100	Исполнитель: VKR100	Исполнитель: VKR100	Исполнитель: VKR100
Исполнитель: VKR100	Исполнитель: VKR100	Исполнитель: VKR100	Исполнитель: VKR100
Исполнитель: VKR100	Исполнитель: VKR100	Исполнитель: VKR100	Исполнитель: VKR100
Исполнитель: VKR100	Исполнитель: VKR100	Исполнитель: VKR100	Исполнитель: VKR100
Исполнитель: VKR100	Исполнитель: VKR100	Исполнитель: VKR100	Исполнитель: VKR100
Исполнитель: VKR100	Исполнитель: VKR100	Исполнитель: VKR100	Исполнитель: VKR100

МАНУАЛЬНЫЕ ПОДСКАЗКИ
КОНСТРУКТОРА

1/10

BILAGA 12 – Datablad Lyftab Nylonhjul Typ 82

Nylonhjul | Lyftab AB

Hjul

Nylonhjul typ 82



Produktinformation

Tillverkat av polyamid 6, nylon.

Hårdhet: 83° Shore D.

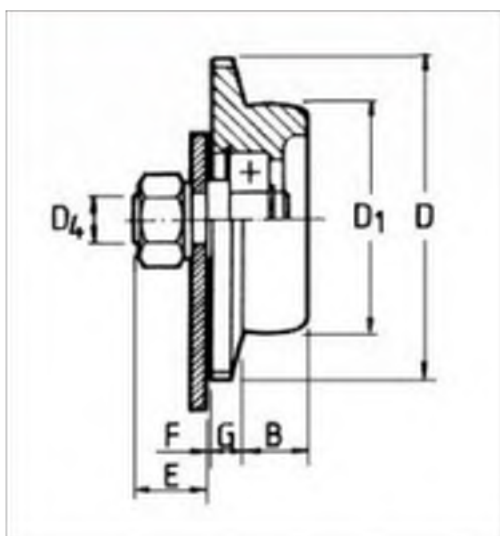
Temp. best.: -20°C – +80°C.

Nylonhjul har hög bärighet, hög slitstyrka och låg vikt. Lågt rullmotstånd på rena jämna underlag och färgar ej av sig. Nylon i rumstemperatur har god beständighet mot vatten, oljor, organiska lösningsmedel och alkalier.

							
Art.nr.	mm	mm	mm	mm	mm	*	kg
793713	40	17	20	15	8	G	18
793714	50	17	20	15	8	G	50
793715	50	20	24	17	8	G	60
761904	50	14	17	18	12	G	80
746333	63	25	30	19	10	G	120
746802	75	20	24	19	10	G	60
746250	75	25	30	22	10	G	160
746251	75	35	45	22	12	G	160
762451	80	30	45	21	12	G	180
762513	80	32	45	30	12	R	180
798015	100	34	47	35	12	R	200
762110	100	30	45	21	12	G	175
793724	100	35	45	24	12	G	225
797315	100	35	45	24	12	R	225
282346	100	35	45	43	8	K1	225
243603	100	35	45	43	10	K1	225
762116	100	40	45	52	15	K	650
798017	125	34	48	39	15	R	200
286260	125	30	45	42	8	K1	200
243604	125	30	45	42	10	K1	200

Flänshjul | Lyftab AB

Flänshjul



Art.nr.	Last kg	D1 mm	D mm	D4 mm	E mm	F mm	G mm	B mm	Vikt kg
789 100	125	70	87	M16	22	1.2	9	20	0.8
765 459	250	70	99	M16	22	1.2	9	20	0.9
789 101	500	100	126	M20	30	1.7	10	25	2.0
789 102	800	140	172	M24	35	3.5	16.5	30	4.9
789 104	1575	140	172	M30	42	3.5	16.5	30	5.0
789 105	3125	160	195	M39	60	3.5	26.5	36	9.0
789 106	5000	300	340	M39	82	4	39	57	31.6

BILAGA 14 – Datablad Iwis transportkedja C2040HP

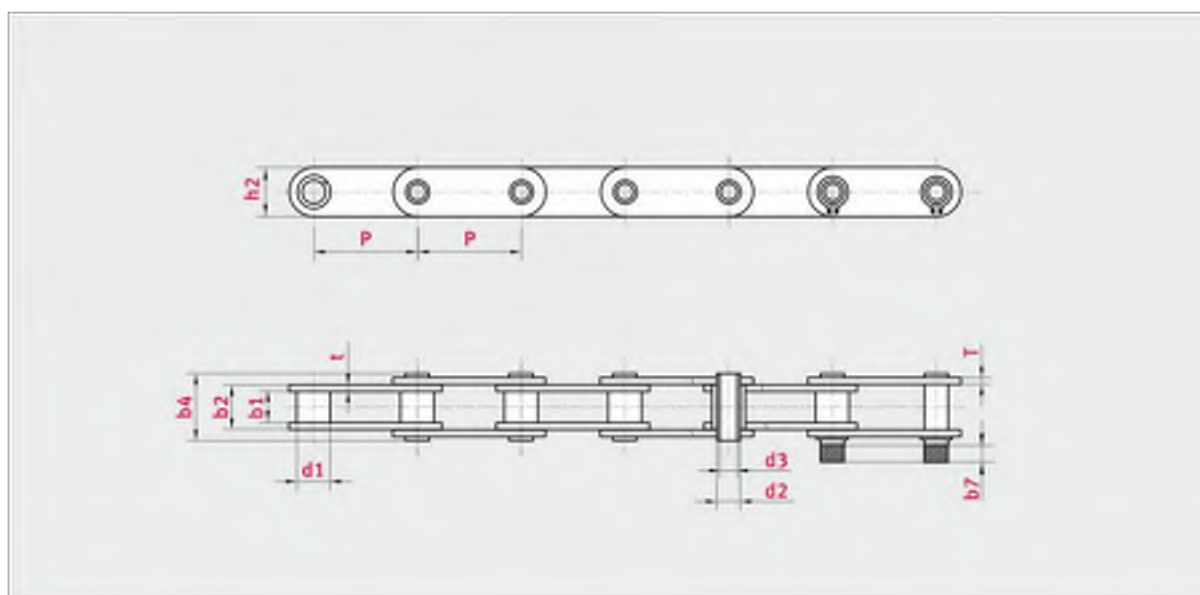


Langglied-Hohlbolzen-Buchsenketten

Double pitch hollow pin bushing chains

iwis.de/4077

Kettentyp	Teilung	Lichte Weite	Buchsen Ø	Hohlbolzen- aussen Ø	Hohlbolzen- innen Ø	Bolzenlänge	Max. zusätzl. Länge für Verschlussglieder Max. add. length of connecting link	Innenglied- breite	Laschen- dicke	Höhe Innenlasche	min. Bruchkraft	Gewicht	Gelenkfläche
Chain no.	Pitch	Width between inner plates	Bush Ø	Hollow pin outer Ø	Hollow pin inner Ø	Pin length		Total width inner link	Plate thickness	Height inner plate	Min. tensile strength	Weight	Bearing surface
	p mm	b1 min. mm	d1 max. mm	d2 max. mm	d3 min. mm	b4 max. mm	b7 max. mm	b2 max. mm	t / T ~ mm	h2 max. mm	F min. KN	kg/m	cm²
C2040HP	25,40	7,85	7,95	5,63	4,00	17,80	3,90	11,15	1,50	12,00	11,0	0,46	0,63
C2050HP	31,75	9,40	10,16	7,22	5,12	21,80	4,10	13,80	2,03	15,00	20,4	0,76	1,00
C2060HP	38,10	12,57	11,91	8,31	6,00	26,90	4,60	17,85	2,42	18,00	24,0	1,02	1,48
C2080HP	50,80	15,75	15,88	11,40	8,05	33,80	5,40	22,50	3,25	24,10	50,0	1,81	2,57



BILAGA 15 – Datablad Servomotor EMME-AS-40-M-LV ASB

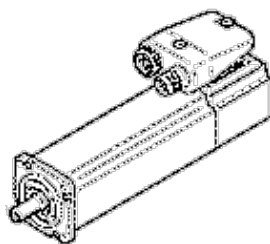
FESTO

Servo motor EMME-AS-40-M-LV ASB

Part number: 2082446

Core product range

Without gear unit/with brake.



Data sheet

Feature	values
Rotor position sensor	Absolute single turn encoder
Rotary position encoder interface	HIPERFACE®
Rotary position encoder measuring principle	Capacitive
Max. speed	10.000 1/min
Nominal rotary speed	9.000 1/min
Operating voltage DC for brake	24 V
Continuous open-circuit current	1,6 A
Insulation protection class	F
Power consumption, brake	8 W
Motor constant	0,175 Nm/A
Nominal operating voltage DC	360 V
Nominal motor power	200 W
Nominal voltage DC	360 V
Nominal motor current	1,2 A
Rotor position encoder, typical resolution	12 Bit
Rotor position encoder, typical angular accuracy	20 arcmin
Rotor position encoder, sinusoidal/cosinusoidal periods per revolution	16
Phase-phase winding resistance	8,6 Ohm
Phase-phase winding inductance	6,6 mH
Type of winding switch	Star inside
Peak current	6,4 A
Voltage constant, phase-to-phase	13,2 mVmin
Rating class according to EN 60034-1	S1
CE mark (see declaration of conformity)	to EU directive for EMC to EU directive low-voltage devices
Corrosion resistance classification CRC	0
Storage temperature	-20 ... 70 °C
Relative air humidity	0 - 90 %
Protection class	IP21
Ambient temperature	-10 ... 40 °C
Authorisation	RCM Mark c UL us - Recognized (OL)
Overall mass moment of inertia at power take-off	0,079 kgcm ²
Brake holding torque	0,4 Nm
Mass moment of inertia of brake	0,014 kgcm ²
Nominal torque	0,21 Nm
Peak torque	1,4 Nm
Standstill torque	0,35 Nm

Permissible axial shaft load	12 N
Permissible radial shaft load	115 N
MTTF, subcomponent	371 years, holding brake
MTTFd, subcomponent	340 years, rotary position encoder
Switching cycles, holding brake	5 million idle actuations (without work of friction!)
Product weight	850 g
Electrical connector system	Plug
Materials note	Contains PWIS substances Conforms to RoHS
Conforms to standard	IEC 60034

BILAGA 16 – Datablad Växellåda EMGA-40-P-G5-EAS-40

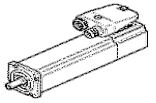
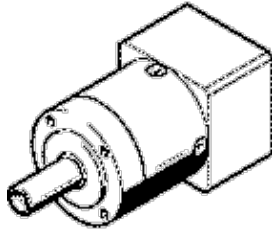
FESTO

Gear unit EMGA-40-P-G5-EAS-40

Part number: 2297685

Core product range

[Suitable for servo motors.](#)



Data sheet

Feature	values
Gear unit flange size	40 mm
Motor flange size	40 mm
Torsional backlash	0,25 deg
Type of gear unit	Planetary gear unit
Gear unit ratio	5:1
Max. input speed	18.000 1/min
Operating temperature of gear unit	-25 ... 90 °C
Protection class	IP54
Continuous output torque	14 Nm
Mass moment of inertia of gear unit	0,019 kgcm ²
Max. output torque	22 Nm
Max. efficiency	98 %
Torsional resistance	1 Nm/arcmin
Product weight	350 g
Gear unit interface, output shaft	40G
Gear unit interface, drive shaft	40P

2016-05-10 – Subject to change – Festo AG & Co. KG

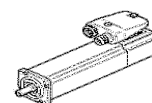
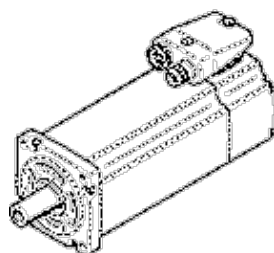
1 / 1

Servo motor EMME-AS-60-SK-LS-AMXB

Part number: 4267575

New

Without gear unit/with brake.

**Data sheet**

Feature	values
Rotor position sensor	Safety Enc. absolut multi turn
Rotary position encoder interface	HIPERFACE®
Rotary position encoder measuring principle	Optical
Safety Integrity Level (SIL), component parts	SIL 2, rotor position encoder SILCL 2, rotor position encoder
Performance Level (PL), component parts	Category 3, Performance Level d, rotor position encoder
PFHd, component parts	1.3 x 10E-8, rotor position encoder
Duration of use Tm, component parts	20 years, rotor position encoder
Max. speed	5.131 1/min
Nominal rotary speed	3.000 1/min
Operating voltage DC for brake	24 V
Continuous open-circuit current	0,9 A
Insulation protection class	F
Power consumption, brake	11 W
Motor constant	0,75 Nm/A
Nominal operating voltage DC	360 V
Nominal motor power	190 W
Nominal voltage DC	360 V
Nominal motor current	0,8 A
Rotor position encoder, typical resolution	15 Bit
Rotor position encoder, typical angular accuracy	20 arcmin
Rotor position encoder, sinusoidal/cosinusoidal periods per revolution	128
Phase-phase winding resistance	26,4 Ohm
Phase-phase winding inductance	37,6 mH
Type of winding switch	Star inside
Peak current	3,6 A
Voltage constant, phase-to-phase	49,6 mVmin
Rating class according to EN 60034-1	S1
CE mark (see declaration of conformity)	to EU directive for EMC to EU directive low-voltage devices
Corrosion resistance classification CRC	0
Storage temperature	-20 ... 70 °C
Relative air humidity	0 - 90 %
Protection class	IP21
Ambient temperature	-10 ... 40 °C
Authorisation	RCM Mark c UL us - Recognized (OL)

Overall mass moment of inertia at power take-off	0,319 kgcm ²
Brake holding torque	2 Nm
Mass moment of inertia of brake	0,086 kgcm ²
Nominal torque	0,6 Nm
Peak torque	2,8 Nm
Standstill torque	0,7 Nm
Permissible axial shaft load	50 N

2016-05-05 – Subject to change – Festo AG & Co. KG

1 / 2

Feature	values
Permissible radial shaft load	250 N
MTTF, subcomponent	538 years, holding brake
MTTFd, subcomponent	874 years, rotor position encoder
Switching cycles, holding brake	5 million idle actuations (without work of friction!)
Product weight	1.650 g
Electrical connector system	Plug
Materials note	Contains PWIS substances Conforms to RoHS
Conforms to standard	IEC 60034
Shaft design Woodruff key	DIN 6885 A 5 x 5 x 22

2016-05-05 – Subject to change – Festo AG & Co. KG

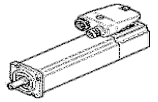
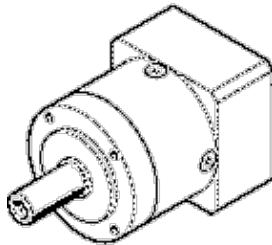
2 / 2

Gear unit EMGA-60-P-G5-EAS-60

Part number: 2297687

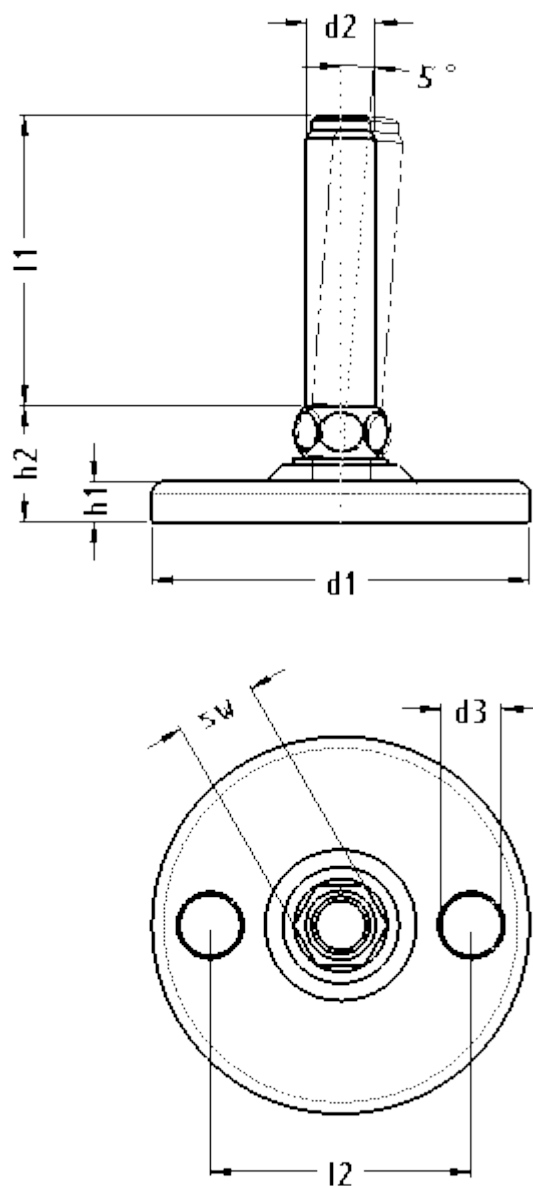
Core product range

Suitable for servo motors.

**Data sheet**

Feature	values
Gear unit flange size	60 mm
Motor flange size	60 mm
Torsional backlash	0,17 deg
Type of gear unit	Planetary gear unit
Gear unit ratio	5:1
Max. input speed	13.000 1/min
Operating temperature of gear unit	-25 ... 90 °C
Protection class	IP54
Continuous output torque	40 Nm
Mass moment of inertia of gear unit	0,078 kgcm ²
Max. output torque	64 Nm
Max. efficiency	98 %
Torsional resistance	2,3 Nm/arcmin
Product weight	900 g
Gear unit interface, output shaft	60H
Gear unit interface, drive shaft	60P

BILAGA 19 – Datablad Maskinsko MN154 M10x50 H63 med fästhål från Eugen Wiberger



d1	d2	l1	h1	h2	d3	l2	sw	Max statisk belastning (N)
63	M10	50	7	19	10,5	45	14	18000
63	M10	100	7	19	10,5	45	14	18000
63	M12	50	7	19	10,5	45	14	18000
63	M12	100	7	19	10,5	45	14	18000
63	M16	50	7	19	10,5	45	16	18000



Flexibelt gripdon för automatiserad hantering av armeringsjärn

Examensarbete
Avancerad nivå, 30hp
Produkt- och processutveckling

Jonas Persson

Datum:
Handledare, Robotdalen:
Handledare, Mälardalens högskola:
Examinator:

2016-05-27
Erik Hellström
Bengt Gustafsson
Sten Grahn

ABSTRACT

This report contains at thesis work that includes 30 credits at advanced level in the subject of product development. The work deals with the implementation of a case study which was carried out at Robotdalen. The thesis work was accomplished by a student from Mälardalen University spring semester 2016.

Robotdalen and Skanska has started a collaboration on a project that deals with implementation of an automation of the manufacturing process of reinforcement cages. The project started because of poor working conditions and Skanska saw an opportunity to improve the environmental impact and enhance product quality by using industrial robots for the manufacturing process. In the project the need of an advanced grip tool was discovered that needs to have the ability to grip reinforced bars in different shaping and be able to rotate 90 degrees from its starting position. The work deals with a solution that are customized for a specific construction of the reinforcement cage assigned from Skanska.

The thesis contains a case study that addressed the research question F1: Is it possible through an automated process, manage and rotate cylindrical objects with a given torque in a limited space? During the project a product development methodology was observed in which the various tools used to develop and evaluate solutions. Throughout cooperation with the job submitter and other project-involved people, solutions could be developed and evaluated towards the mission.

The result of the work confirms that the research question is possible in which a customized grip tool was constructed for the project purpose. To ensure that the design can handle the stress that affects the tool calculations, movement analysis and FEM-calculations was conducted in SolidWorks in which the critical component had the factor of safety 3.7. The final concept has a majority of standard components where pneumatic cylinders and related accessories were used to perform all operations. Because the limited space and the high required force of the gripper has been a critical variable of this mission, the solution results contributed to a compact design. The gripping unit acquire about 50 % of a standard parallel gripper in size and 1/3 of its weight in the same force capacity.

Since Skanska aims to in the future be able to manufacture all kinds of structures of reinforcement cages the final concept resulted in removable parts that can be replaced with other components to suit the additional structures.

Keywords: Automation, Industrial Robot, Reinforcing Cage, Reinforced Bar, Rebar, Robot Application, Gripper

SAMMANFATTNING

Denna rapport innehåller ett examenarbete som innefattar 30 högskolepoäng på avancerad nivå inom ämnet produktutveckling. Arbetet behandlar ett genomförande av en fallstudie som genomförts hos Robotdalen. Examensarbetet är genomfört av en student från Mälardalens Högskola vårterminen 2016.

Robotdalen och Skanska har startat ett samarbete angående ett projekt som behandlar automatisering av tillverkningsprocessen för armeringsburar. Projektet startade på grund av bristande arbetsförhållanden samt för möjligheter att förbättra miljöpåverkan och öka produktens kvalitet genom användningen av industrirobotar. I projektet har ett behov av ett avancerat gripdon upptäckts som ska ha möjligheten att gripa armeringsjärn i olika utformningar samt kunna rotera 90 grader från ursprungspositionen. I arbetet behandlas ett lösning anpassat till en specifik konstruktion av armeringsbur tilldelat från Skanska.

Arbetet består av en fallstudie som behandlat forskningsfrågan, *Är det möjligt att genom en automatiserad process, hantera och rotera cylindriska föremål med ett givet vridmoment i ett begränsat utrymme?* Under projektet följdes en produktutvecklingsmetodik där olika verktyg användes för att ta fram och utvärdera lösningar. Genom samarbete med uppdragsgivare och projektinvolverade kunde lösningar tas fram och utvärderas efter uppgiftens mål.

Resultatet av arbetet bekräftar att det är möjligt att besvara forskningsfrågan med ett ja, där ett specialanpassat gripdon konstruerades efter projektets ändamål. För att säkerställa att konstruktionen klarar de påfrestningar som berör verktyget har beräkningar samt rörelse- och FEM-analyser genomförts i Solid Works där den kritiska komponenten erhöll säkerhetsfaktorn 3,7. I slutkonceptet används majoriteten standardkomponenter där pneumatiska cylindrar och tillbehör till dessa har använts för att utföra alla moment. Eftersom det begränsade utrymmet samt den höga begärda kraften hos gripenheten har varit en drivande faktor under projektets gång har lösningens resultat bidragit till ett kompakt utförande. Gripenheten erhåller ca 50 % av ett standardgripdons storlek och 1/3 av dess vikt av med samma kraftkapacitet.

Eftersom Skanska strävar efter att i längden möjliggöra tillverkningen av alla konstruktioner av armeringsburar resulterade slutkonceptet i löstagbara delar som kan ersättas till andra komponenter som passar andra armeringsburar.

Nyckelord: Armeringsbur, Armeringsjärn, Automatisering, Gripdon, Industrirobot, Robotapplikation

FÖRORD

Författaren önskar tacka Robotdalen samt Skanska Sverige AB för möjligheten till detta uppdrag och det stöd som anordnats under projektets gång. Även RAC för den kunskap som tilldelats inom området robotapplikationer som författaren kunnat ta nytta av.

Ett stort tack till Erik Hellström, Josef Holmner, Anders Thunell och Ingemar Reyier, handledare och anställda hos Robotdalen. Personerna har varit till stor hjälp genom att dela kunskap från sin långa erfarenhet av robotapplikationer och tekniska lösningar. Ett stort tack till den vägledning som gjorts under projektet. Även ett tack till forskningsassistenterna Anton Sandegren och Erik Viström, anställda hos Robotdalen, för det stora bidraget av kunskap som givits till uppdraget.

Ett stort tack till Patrik Groth, projektledare Skanska Sverige AB, för engagemang och överlämning av all relevant information för projektet, även för anordning av besök på anläggningar.

Författaren vill slutligen tacka Bengt Gustafsson, handledare på Mälardalens Högskola, för det stora engagemanget, kunnande samt för vägledning och återkoppling under projektet.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1	INLEDNING	1
1.1	BAKGRUND.....	1
1.1.1	ROBOTDALEN	1
1.1.2	SKANSKA.....	1
1.1.3	UPPDRAG	1
1.1.	PROBLEMFORMULERING	2
1.1.	SYFTE OCH FRÅGESTÄLLNINGAR	3
1.2	AVGRÄNSNINGAR	4
2	METOD	5
2.1	PRODUKTUTVECKLINGSPROCESSEN	5
2.2	DATAINSAMLINGSMETODIK	6
2.2.1	INTERVJUER.....	6
2.2.2	TEKNISKT DATAUNDERLAG VIA INTERNET OCH ANDRA KÄLLOR.....	6
2.2.3	TEKNISKT DATAUNDERLAG FRÅN UPPDRAGSGIVAREN OCH ANDRA INBLANDADE	6
2.3	VERKTYG	7
2.3.1	LITTERATURSTUDIER OCH DATABASES.....	7
2.3.2	DATORSTÖDD PRODUKTUTVECKLING	7
2.4	PRODUKTUTVECKLINGSMETODIK.....	7
2.4.1	FAS 1 – PROBLEMFORMULERING.....	7
2.4.2	FAS 2 – KONCEPTGENERERING	8
2.4.3	FAS 3 - DESIGN PÅ SYSTEMNIVÅ	11
2.4.4	FAS 4 - DESIGN PÅ DETALJNIVÅ.....	12
	TEORETISK REFERENSRAM	13
2.5	ABB INDUSTRIROBOTAR	13
2.5.1	IRB 4600	13
2.5.2	VERKTYGSVÄXLARE OCH SVIVEL	14
2.5.3	APPLIKATIONER INOM PNEUMATIK & ELEKTRONIK	14
2.6	ARMERINGSJÄRN	15
2.7	MANUELL TILLVERKNING AV ARMERINGSBUR OCH GJUTNING	16
2.8	AUTOMATISK TILLVERKNING AV ARMERINGSBUR	17
3	TILLÄMPAD LÖSNINGSMETODIK.....	20
3.1	FAS 1 – PROBLEMFORMULERING	20
3.1.1	DEN TÄNKTA TILLVERKNINGSPROCESSEN	20
3.2	FAS 2 – KONCEPTGENERERING	25
3.2.1	GANTT-SCHEMA	25
3.2.2	OMVÄRLDSANALYS	25
3.2.3	FUNKTIONSANALYS	29

3.2.4.....	29
3.2.5 KRAVSPECIFIKATION	30
3.2.6 KONCEPTGENERERING	31
3.2.7 KONCEPTVAL	35
3.3 FAS 3 – DESIGN PÅ SYSTEMNIVÅ	39
3.3.1 KOMPONENTVAL OCH FUNKTIONER	40
3.4 FAS 4 – DESIGN PÅ DETALJNIVÅ.....	43
3.4.1 KOMPONENTDEFINIERING & DETALJUTVECKLING	43
3.4.2 SIMULERINGAR	51
4 RESULTAT	55
4.1 SLUTKONCEPT	55
4.2 PROCESSEN	58
4.3 MATERIAL OCH VIKT	58
5 ANALYS.....	60
5.1 FRÅGESTÄLLNING.....	60
5.2 ANALYS AV KRAVSPECIFIKATION	62
6 SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER	65
6.1 SLUTSATSER	65
6.2 REKOMMENDATIONER	66
6.2.1 ROBOTSIMULERING	66
6.2.2 KONSTRUKTION & DATORSTÖDD PRODUKTUTVECKLING	66
6.2.3 PRAKTISKA TESTER	66
6.2.4 NYA FRÅGESTÄLLNINGAR.....	66

FIGURFÖRTECKNING

FIGUR 1 – ETT PROBLEMATISKT FALL AV ROTATION PÅ ARMERINGSJÄRN (HÄMTAT IFRÅN SIMULERING FRÅN ROBOT STUDIO)...	3
FIGUR 2 - PRODUKTUTVECKLINGSPROCESSEN BESKRIVEN AV ULRICH OCH EPPINGER (2012)	5
FIGUR 3 – DEN MODIFIERADE PRODUKTUTVECKLINGSPROCESSEN.....	6
FIGUR 4 - EXEMPEL PÅ GANTT-SCEHMA (EXAMPLE GANTT CHART, 2014)	8
FIGUR 5 - A FIVE-STEP METHOD, BESKRIVEN AV ULRICH & EPPINGER (2012)	10
FIGUR 6 - EXEMPEL PÅ PUGHS MATRIS (WHAT IS A PUGH MATRIX?, 2016).....	11
FIGUR 7 - INDUSTRIROBOT FRÅN ABB, IRB 4600 SAMT REDOVISNING FÖR ROBOTENS AXLAR (ABB, 2016) (ROBOT MOVEMENT, 2011).....	13
FIGUR 8 - VERKTYGSVÄXLARE MED SVIVEL	14
FIGUR 9 - ENKEL- OCH DUBBELVERKANDE PNEUMATISKA CYLINDRAR	15
FIGUR 10 - FÖRANKRING MED ARMERINGSSTÅNG (BEGROUP, 2016).....	15
FIGUR 11 - MANUELL TILLVERKNINGSPROCESS AV ARMERINGSBUR (BEGROUP, 2016)	16
FIGUR 12 - NAJTÅNG OCH NAJTRÅD (MER ISOLERING OCH ARMERING, 2010)	16
FIGUR 13 - ILLUSTRATION AV GJUTNING AV BETONG PÅ BRO (SVENSKBETONG, 2014).....	17
FIGUR 14 - VISUALISERING AV DEN TÄNKTA AUTOMATISKA TILLVERKNINGSSTATIONEN (BILD TAGEN FRÅN ROBOTSTUDIO)....	17
FIGUR 15 - AUTOMATISKA TILLVERKNINGSPROCESSEN	18
FIGUR 16 - ILLUSTRATION AV TRANSPORTERING AV ARMERINGSBUR FRÅN STATIONEN (BILD TAGEN FRÅN ROBOTSTUDIO)	19
FIGUR 17 - ILLUSTRATION FÖR PROBLEMFORMULERINGENS POSITION I PRODUKTUTVECKLINGSPROCESSEN	20
FIGUR 18 - DE OLIKA BOCKNINGARNA AV ARMERINGSJÄRN	20
FIGUR 19 - ILLUSTRATION FÖR HÄMTNINGSPPOSITIONER FRÅN FIXTUR.....	21
FIGUR 20 - ROBOTENS MÖJLIGHET ATT ROTERA ARMERINGSJÄRN I TVÅ RIKTNINGAR PRESENTERAS	22
FIGUR 21 - UTRYMMESMÄTNING I ROBOTSTUDIO	22
FIGUR 22 - EXTREMFALLET DÅR ETT C-BOCKAT ARMERINGSJÄRN BERÄKNAS.....	23
FIGUR 23 - KRAFTER SOM PÅVERKAR ARMERINGSJÄRN	23
FIGUR 24 - FRIKTIONSKRAFTER SOM PÅVERKAR ARMERINGSJÄRNENET	24
FIGUR 25 - KONCEPTGENERERINGENS POSITION I PRODUKTUTVECKLINGSPROCESSEN.....	25
FIGUR 26 - STANDARDGRIPDON FRÅN FESTO (GRIPPER, 2016).....	25
FIGUR 27 - FÖRKLARING AV KONCENTRISK FUNKTION (SCROLL CHUCKS, 2016).....	26
FIGUR 28 - KONCENTRISKA PRODUKTER (HOSE CRIMPING MACHINE - P20HP, 2016) (TAPER MOUNT HEAVY DUTY DRILL CHUCK, 2016) (SKÖVDE RIDSPORT, 2016)	26
FIGUR 29 – POLYGRIP & ROBOTAPPLIKATION FÖR GREPP AV KASSETTER (KNIPEX POLYGRIP, 2016) (GOOGLE PATENT, 2013)	26
FIGUR 30 – ELEKTROMAGNET (ADAMS MAGNETIC PRODUCTS, 2016).....	27
FIGUR 31 - LINJÄR-ROTERTANDE RÖRELSE (KINEMATICS PROBLEMS, 2016) (SCOTCH YOKE MECHANISM, 2013)	27
FIGUR 32 - WORMGEAR (DIRECT INDUSTRY, 2016) & KUGG MED KUGGSTÅNG (DIRECT INDUSTRY, 2016).....	27
FIGUR 33 - KRAV FÖR GEOMETRI I URSPRUNGLÄGE.....	31
FIGUR 34 - KRAV FÖR GEOMETRI I ROTERAT LÄGE	31
FIGUR 35 - KONCEPT 1.....	32
FIGUR 36 - KONCEPT 2.....	32
FIGUR 37 - KONCEPT 3.....	32
FIGUR 38 - KONCEPT 5.....	33
FIGUR 39 - KONCEPT 4.....	33
FIGUR 40 - KONCEPT 6.....	33
FIGUR 41 - KONCEPT 7.....	34
FIGUR 42 - KONCEPT 8.....	34
FIGUR 43 - KONCEPT 9.....	34
FIGUR 44 - KONCEPT 10.....	35
FIGUR 45 - KONCEPT 11.....	35
FIGUR 47 - KONCEPTUTVÄRDERING MED PUGHS MATRIS PÅ GRIPFUNKTIONEN	39
FIGUR 47 - KONCEPTUTVÄRDERING GENOM PUGHS MATRIS PÅ ROTATIONSFUNKTIONEN.....	39
FIGUR 48 - POSITION FÖR FASEN DESIGN PÅ SYSTEMNIVÅ I PRODUKTUTVECKLINGSPROCESSEN	39
FIGUR 49 - HEPKO MOTIONS PRODUKT PRT2	40
FIGUR 50 - KONCEPT 9 MED PRT2 MONTERAT	41
FIGUR 51 - KONCEPT 11 UNDER SYSTEMUTVECKLING	41

FIGUR 52 - ILLUSTRERING AV DIMENSIONER.....	42
FIGUR 53 - POSITION AV FAS 3 I PRODUKTUTVECKLINGSPROCESSEN	43
FIGUR 54 - KOMPONENTDEFINIERING AV KONCEPT 11	43
FIGUR 55 - GODKÄNDA TESTET AV GRIPKRAFT.....	44
FIGUR 56 - GRIPKLONS KOMPONENTER	45
FIGUR 57 - POSITIONERING AV GLIDLAGER	45
FIGUR 58 - GRIPCYLINDER SAMT SLANGKOPPLARE.....	46
FIGUR 59 - FÄSTE FÖR ROTATIONSCYLINDERNS KOLV	47
FIGUR 60 - ROTATIONSRÖRELSE	47
FIGUR 61 - ARMERINGSJÄRNETS TYNGDPUNKT & DIMENSIONER FÖR BERÄKNING.....	48
FIGUR 62 - ILLUSTRATION AV APPLICERADE KRAFTER	48
FIGUR 63 - TILLBEHÖR TILL Roterande PNEUMATISKA CYLINDERN (FESTO, 2016)	49
FIGUR 64 - POSITIONERING AV RoteringsCYLINDERN	49
FIGUR 65 - HÅL FÖR SLANGAR I HÖLJET & SLANGHÅLLARE (FESTO, 2016)	50
FIGUR 66 - HÖLJETS DELAR	50
FIGUR 67 - FEM-ANALYS AV GRIPKLON	51
FIGUR 68 - FEM-ANALYS AV POLYURETANFÄSTE	51
FIGUR 69 - FEM-ANALYS FÖR FÄSTE AV KOLV	52
FIGUR 70 - FEM-ANALYS PÅ HÖLJE.....	52
FIGUR 71 - FEM-ANALYS FÖR FÖRFLYTTNING VID ROTATIONSPUNKT	53
FIGUR 72 – FEM-ANALYS FÖR BAKRE HÖLJE	53
FIGUR 73 - ILLUSTRATION AV SLUTKONCEPT.....	55
FIGUR 74 - SLUTKONCEPTETS DIMENSIONER	56
FIGUR 75 - GRIPENHET.....	56
FIGUR 76 - REDOVISNING AV SLUTKONCEPTETS ROTATION OCH INRE KOMPONENTER.....	57
FIGUR 77 - INFORMATION FÖR ABB-INDUSTRIROBOTEN IRB4600.....	71
FIGUR 78 - INFORMATION FÖR ABB-INDUSTRIROBOTEN IRB4600.....	72
FIGUR 79 - PRODUKTINFORMATION FÖR VERKTYGSVÄXLARE OCH SVIVEL	73
FIGUR 80 - RITNINGAR FÖR VERKTYGSVÄXLARE OCH SVIVEL	74
FIGUR 81 - DEN TÄNKTA AUTOMATISKA PROCESSENS MOMENT	75
FIGUR 82 - GANTT-SCHEMA UR OFFICE PROJECT PROFESSIONAL, SIDA 1.....	76
FIGUR 83 - GANTT-SCHEMA UR OFFICE PROJECT PROFESSIONAL, SIDA 2.....	77
FIGUR 84 - GANTT-SCHEMA UR OFFICE PROJECT PROFESSIONAL, SIDA 3.....	78
FIGUR 85 - GANTT-SCHEMA UR OFFICE PROJECT PROFESSIONAL, SIDA 4.....	79
FIGUR 86 - STANDARDGRIPDON FRÅN FESTO (GRIPPERS, 2016)	82
FIGUR 87 - LOGGERHEAD PATENTBILDER (GOOGLE PATENT, 2011).....	83
FIGUR 88 - LOGGERHEAD PATENTBILDER (GOOGLE PATENT, 2011).....	84
FIGUR 89 - KASSETT-GRIPDON FRÅN PATENTBAS (GOOGLE PATENT, 2013).....	85
FIGUR 90 - KASSETT-GRIPDON FRÅN PATENTBAS (GOOGLE PATENT, 2013).....	86
FIGUR 91 - GLIDBUSSNING FRÅN INTERNORDIC	87
FIGUR 92 - PRODUKTINFORMATION FÖR GRIPCYLINDERN	88
FIGUR 93 - PRODUKTINFORMATION FÖR ROTATIONSCYLINDERN	89
FIGUR 94 - KOMPLETT SIMULERING AV GRIPKLO	90
FIGUR 95 - KOMPLETT SIMULERING AV POLYURETANFÄSTE	90
FIGUR 96 - KOMPLETT SIMULERING AV FÄSTE FÖR KOLVGAFFEL	91
FIGUR 97 - KOMPLETT SIMULERING AV HÖLJE	91
FIGUR 98 - KOMPLETT SIMULERING AV HÖLJET BAKSIDA.....	92

TABELLFÖRTECKNING

TABELL 1 - INFORMATION OM ARMERINGSJÄRN.....	23
TABELL 2 - UTVÄRDERING AV OMVÄRLDSANALYS	28
TABELL 3 - FUNKTIONSANALYS	29
TABELL 4 - KRAVSPECIFIKATION	30
TABELL 5 - SAMMANSTÄLLNING AV KONCEPTGENERERING	36
TABELL 6 - VAL FÖR VIDARE UTVÄRDERING	38
TABELL 7 - SAMMANSTÄLLNING AV SYSTEMUTVECKLING OCH VAL AV KONCEPT	42
TABELL 8 - TESTDATA	44
TABELL 9 - BERÄKNING AV SLAGLÄNGD	46
TABELL 10 - PRODUKTINFORMATION, ADN-80-30-I-P-A-R3.....	46
TABELL 11 - PRODUKTINFORMATION, ADN-50-120-I-P-A-R3.....	49
TABELL 12 - SAMMANSTÄLLNING AV SIMULERING.....	54
TABELL 13 - MATERIALINFORMATION, AL-6160-R6	58
TABELL 14 - VIKTTABELL	59

FÖRKORTNINGAR

CAD	Computer Aided Design
FOS	Factor of safety
FOS	Factor of safety
IDT	Akademien för Innovation, Design och Teknik
MDH	Mälardalens Högskola
PTFE	Polytetrafluoreten
PUR	Polyuretan
RAC	Robot Application Center
TCP	Tool Center Point

1 INLEDNING

Följande rapport ingår i ett examensarbete som genomfördes våren 2016 vilket omfattar 30 högskolepoäng på avancerad nivå inom ämnet produktutveckling. Projektet utfördes av en civilingenjörstudent vid Mälardalens Högskola (MDH) på Robotdalen och i samarbete med deras uppdragsgivare Skanska. Studenten har under projektet handletts av Erik Hellström på Robotdalen och Bengt Gustafsson på MDH i Eskilstuna (akademin för Innovation, Design och Teknik).

1.1 Bakgrund

1.1.1 Robotdalen

Robotdalen är ett företag som fokuserar på ny utveckling av robotlösningar. Genom att föra samman näringsliv, offentliga aktörer samt akademi skapar de möjligheten att få en framgångsrik utveckling för industri, service, samt vård och omsorg. Utvecklingen utgår från konstaterade behov och slutanvändaren medverkar i hela processen. Företaget har en stor erfarenhet av produktutveckling och har idag bidragit till 32 nya produkter, 28 nya företag på marknaden och 2 internationella företagsetableringar. (Robotdalen, 2016)

1.1.2 Skanska

Skanska är en av Sveriges största byggorganisationer. Verksamheten är uppdelad i fyra parter, bygg- och anläggningsverksamhet, bostadsutveckling, kommersiell utveckling och infrastruktur. Företaget har totalt 58 000 anställda i världen och omsätter 145 miljarder SEK globalt (Skanska, 2016). Skanska prioriterar hållbarhet, säkerhet, etik och mångfald då de anser att detta är faktorer som gör att företaget har bra förutsättningar för både arbetare samt aktiva projekt. (Skanska, 2016)

1.1.3 Uppdrag

I de allra flesta byggnadsprojekt används armeringskorgar vid gjutning hos Skanska. Korgarna tillverkas genom najning/svetsning av armeringsjärn som kapats och bockats i olika variationer. I en specifik armeringsbur som tilldelats av Skanska har armeringsjärnen en längd upp till 12 meter samt en diameter på maximalt 25 millimeter där den tyngsta väger ca 46 kg. På grund av långa ledtider samt dåliga arbetsförhållanden har Skanska startat ett projekt med Robotdalen där ett flertal industrirobotar tillsammans utför tillverkningen av armeringskorgar automatiskt.

Tanken med den automatiska processen är genom att bygga en station med rätnings- och bockningsmaskin, fixturering samt gantry med tre robotar på byggnadsområdet.

Tanken är att en station ska byggas upp i byggnadsområdet som innehåller alla moment som en automatiserad process kräver, såsom rätnings- och bockningsmaskin, fixturering samt gantry med tre robotar. Stationen ska ha möjlighet att bygga armeringsburar genom att rätta ut och bocka armeringsjärn från rulle som sedan ska placeras på en fixtur så att järnets koordinatsystem kan fastställas. Tre robotar kommer sedan gemensamt förflytta järnet till önskad plats på buren och sedan naja/svetsa fast det. När processen är klar ska en lyftkran förflytta buren till önskad plats.

Projektet är indelat i flera delprojekt där alla moment slutligen ska kombineras till en station. I delprojekten behandlas konstruktionen av robotverktyg, robotsimuleringar, programmering, beräkningar, fixtur för armeringsjärn m.m. Uppdraget i följande rapport behandlar ett av de avancerade gripdon som ska hantera orienteringen av armeringsjärn.

1.1. Problemformulering

Hantering av armeringsjärn i produktionen av burar är idag ett väldigt ansträngande arbete. De långa och tunga armeringsjärnen gör att arbetarna som hanterar dessa blir lidande. I den manuella processen monteras i snitt ca 100kg/h armering per man vilket innebär att det krävs ca 40 arbetare för att tillverka en armeringsbur i samma hastighet som tre industrirobotar utför arbetet. Detta leder till att den manuella processen behöver många arbetstimmar vilket ofta resulterar i långa ledtider. Då arbetsförhållanden är bristande blir även kvaliteten varierande på olika burar.

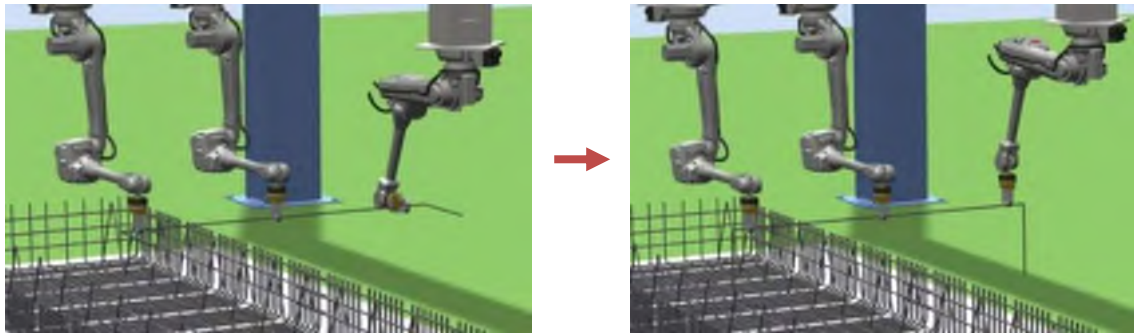
I den tänkta tillverkningsprocessen finns tre industrirobotar som orienterar armeringsjärnen efter den position som krävs av armeringsburens konstruktion. I ett flertal moment krävs orienteringar utöver robotarnas kapacitet eftersom både industrirobotarnas rörelseutrymme är begränsat samt att gantryn har en given längd på x-, y- och z-axeln.

I ett antal fall ska ett bockat armeringsjärn hämtas ifrån fixturen, rotera samt förflytta till en given position. I ett av dessa fall ska ett armeringsjärn hämtas från fixturen och därefter roteras 180 grader för att sedan monteras ihop med resterande armeringsjärn. Om ett standardgripdon används på den drivande industriroboten som endast applicerar en gripkraft behöver industriroboten utföra 180 graders rotation samtidigt som industriroboten rör sig i z-led i gantryn för att bibehålla armeringsjärnet i samma position. Problemet är att roboten inte har möjlighet att utföra hela rotationen eftersom industrirobotens rörelseomfattning inte är tillräcklig och därmed bara kan rotera armeringsjärnet lite mer än halva rörelsen.

I ett annat fall krävs det att ett C-bockat armeringsjärn ska utföra en rotering och därefter placera det i ett begränsat område. Detta gör att industrirobotarnas grepp måste appliceras på ett specifikt ställe på järnet vilket gör att ett högt vridmoment skapas. För att motstå vridmomentet krävs en hög kraft hos gripdonet vilket gör att geometrin på dagens standardgripdon blir för stor. Detta är ett problem när gripdonet behöver roteras och därefter placeras i ett begränsat område.

Under den automatiska processen av robotar blir därför hanteringen av armeringsjärn i vissa fall omöjlig med ett standardgripdon. Armeringen ska kunna roteras vilket leder till att roboten måste göra en omkonfigurering eftersom rotationen ligger utanför robotens roteringsvidd°. För att möjliggöra alla positioner och rotationer för industriroboten krävs ett verktyg som kan utföra en rotation på 90.¹

¹ Josef Holmner, Robotdalen



Figur 1 – Ett problematiskt fall av rotation på armeringsjärn (hämtat ifrån simulering från Robot Studio)

I figur 1 illustreras ett av de fall där roboten ska utföra en vändning vilket den inte har möjlighet att genomföra. I figuren är en förenklad robotsimulering genomförd där problemet ignoreras.

1.1. Syfte och frågeställningar

Syftet med Skanskas projekt är att med en automatisk process minska tillverkningstider, kostnader och samtidigt öka kvaliteten på armeringskorgar. Detta ska även resultera i förbättrade arbetsförutsättningar för anställda och en minskad miljöpåverkan.

För att ha möjlighet att orientera armeringsjärnen i alla positioner samt låsa position för svetsning/najning i en armeringsbur krävs ett robotverktyg som kan gripa och rotera järnet radiellt.

Frågeställningen som ligger i grund för detta delprojekt definieras som:

F1: Är det möjligt att genom en automatiserad process, hantera och rotera cylindriska föremål med ett givet vridmoment i ett begränsat utrymme?

För att uppnå en hög funktionalitet av verktyget samt säkerställa att dess funktioner inte förhindrar eller försenar andra moment i processen bör vissa mål uppnås. För att garantera att armeringsjärnen hanteras och placeras på rätt positioner behövs en precision på ± 5 mm.

Hastigheten på verktygets moment ska inte försena den tänkta processens faser. Därför behövs verktyget utföra dess moment i "rumsliga" tidsbegränsningar. Verktyget antas av den anledningen att hantera dess moment under 10 sekunder.

1.2 Avgränsningar

Examensarbetet omfattar 30 högskolepoäng vilket innebär 20 veckors arbete med 40 timmar i veckan. Projektet är avgränsat till perioden 18 januari 2016 – 10 juni 2016.

Arbetet är ett delprojekt ur det projektet som Skanska och Robotdalen startat, där endast konstruktionen av ett gripdon kommer behandlas. Dock kommer konstruktionen formas efter de förutsättningar som ställs från andra delprojekt.

I arbetet kommer varken någon form av programmering utföras eller lokalisering av armeringsjärn beaktas. Då endast konceptet skall bevisa funktionaliteten av verktyget kommer inte heller kostnadsoptimering vara relevant i arbetet. Projektet omfattar inte någon form av produktionsförberedelser då uppdraget klassas som ett "proof of concept".

Slutkonceptet ska inte tillverkas eller testas i praktiken men ska undersökas teoretiskt där beräkningar, rörelseanalyser samt FEM-beräkningar kommer att genomföras i Solid Works för att säkerställa konstruktionen.

Arbetet betraktar inte heller armeringens dynamiska beteenden såsom nedböjning eller vibrationer under körning.

Resultatet är avgränsat till utförandet av en specifik armeringsbur tilldelat av Skanska. Verktyget kan därmed användas på armeringsburar med samma begränsningar som den specifika armeringsburen.

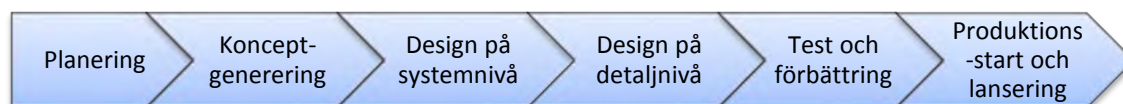
Eftersom industriroboten kan förse verktyget med elektronik eller tryckluft ska endast detta användas för att utföra de olika momenten som krävs för uppgiften.

2 METOD

Arbetet baseras på en fallstudie som genomförts hos Robotdalen som samarbetar i ett projekt med Skanska där en omfattande studie utförts via primära och sekundära datainsamlingar. De primära data som behandlats har varit i form av ostrukturerade samt semistrukturerade intervjuer hos uppdragsgivaren samt observationer på fältstudier. Den sekundära datainsamlingen har genomförts genom internet, databaser, litteratur samt Skanskas datanät.

2.1 Produktutvecklingsprocessen

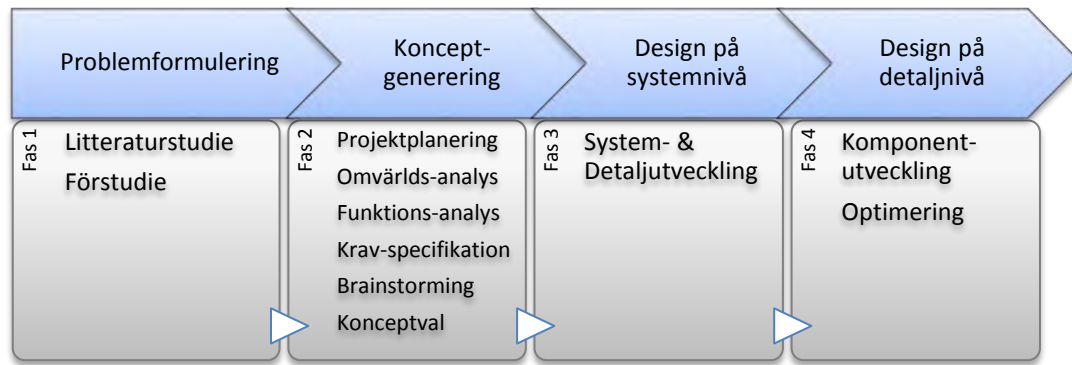
För att utvecklingen i ett projekt ska hanteras på ett systematiskt sätt finns flera olika tillvägagångssätt att göra detta på. Ofta är det lämpligt att använda en dokumenterad utvecklingsprocess som är ledande under projektets gång. I detta projekt har en produktutvecklingsprocess delats upp flera steg enligt Ulrich & Eppinger (2012). Produktutvecklingsprocessen beskriver tillvägagångssättet från planering till lansering av produkten, se figur 2.



Figur 2 - Produktutvecklingsprocessen beskriven av Ulrich och Eppinger (2012)

Eftersom examensarbetet är ett projekt som klassas som ett "proof of concept", innebär detta att inte alla faser behöver utföras. Därför används en modifierad version av Ulrich & Eppinger's produktutvecklingsprocess som är anpassad efter detta arbete. Då arbetet skall endast resultera i en teknisk lösning som bevisar teoretiskt att projektets frågeställningar har besvarats så krävs varken praktiska tester eller produktionsförberedelser. Projektet drivs även av de krav som identifierats av Robotdalen och Skanska vilket gör att alla moment i fas 1 redan har behandlats och kommer utnyttjas, såsom identifiering av kundens krav och möjligheter av den tänkta produkten. Det har även tillkommit en extra fas för att få kännedom om problemet då författarens förkunskaper var bristande inom området. Varje fas består av metoder och verktyg som följs efter Ulrich & Eppinger's riktlinjer.

Den modifierade produktutvecklingsprocessen med metoder och verktyg från Ulrich & Eppinger (2012) har varit till grund för arbetet. Denna har varit en central del och styrt arbetet under projektets gång, se figur 3.



Figur 3 – Den modifierade produktutvecklingsprocessen

2.2 Datainsamlingsmetodik

Datainsamling har främst utförts genom fältstudier där observationer och intervjuer har genomförts men även genom internet och andra källor. Då uppdragen i detta projekt är nytt och inte finns på marknaden samt att uppdraget var sekretessbelagt finns mycket av den relevanta informationen hos uppdragsgivarna.

2.2.1 Intervjuer

Intervjuer har varit en central del i projektet. Problemet i projektet är något nytt, vilket gör att majoriteten av den relevanta informationen är dokumenterad hos uppdragsgivarna. Uppdraget berör dessutom flera delar i "helhetsprojektet" och ska senare sammanfogas med andra delprojekt som arbetar parallellt. Av den anledningen har intervjuer kontinuerligt inträffat och har bestått av ostrukturerade samt semi-strukturerade intervjuer.

Intervjuerna genomfördes i kontinuerliga möten med involverade medlemmar samt oplanerade möten med personer som besatt den kompetens som krävdes för frågeställningarna.

2.2.2 Tekniskt dataunderlag via internet och andra källor

För att uppnå det förväntade resultatet krävs en väl teknisk dataunderlagsinsamling som sökts fram och analyserats genom internet och andra källor. Då uppgiften är att undersöka om det är möjligt att hantera armeringsjärn under de krav som ställs, behövs även en utförlig insamling av information och data av industrirobotar, robotapplikationer, gripdon, motorer, cylindrar och annan relevant data som kan användas i den automatiserade processen.

2.2.3 Tekniskt dataunderlag från uppdragsgivaren och andra inblandade

För att produkten ska uppnå det resultat som förväntas, definieras krav från uppdragsgivaren som skall uppfyllas. Genom att samarbeta med projektinvolverade medlemmar kunde kraven även behandlas och egna krav och mål fastställas. Majoriteten av underlaget som bidragits från andra delprojekt har varit i form av CAD-modeller och ritningar för att ha möjligheten att arbeta effektivt parallellt.

2.3 Verktyg

2.3.1 Litteraturstudier och databaser

Projektet innefattar en uppgift med många moment och som tidigare inte genomförts i praktiken, vilket har medfört att litteraturstudier har gjorts. Litteraturstudierna används främst för att studera och analysera olika produktutvecklingsmetoder och tillämpa verktyg för att på ett effektivt sätt utreda och lösa problemet.

De litteraturstudier som genomförts har varit i form av databassökningar, böcker, internetkällor och tidigare rapporter. Eftersom uppgiften behandlar ny teknik så har målet varit att genomföra sökningar och ta del av så ny forskning som möjligt. Vid sökning av databaser har främst Google Scholar och Web of Science utnyttjats.

2.3.2 Datorstödd produktutveckling

Uppdraget var att bevisa en teknisk lösning till hanteringen av armeringsjärn vilket berörde höga belastningar och krafter under rotation. Detta kan medföra långa beräkningar av konstruktionen hos de rörliga delarna. Datorstödd produktutveckling har nyttjats i projektet där programmet Solid Works har använts för 3d-modelering, rörelsestudier samt för FEM-beräkningar. I rörelsestudierna kan kraften beräknas hos cylindrar eller motorer som krävs för att röra konstruktionen. Genom att använda FEM-beräkningar kan påfrestningar beräknas i olika situationer.

2.4 Produktutvecklingsmetodik

2.4.1 Fas 1 – Problemformulering

För att i grunden kunna genomföra en konceptgenereringsfas ska enligt Ulrich & Eppinger (2012) författaren besitta den kunskap som krävs för att identifiera kundens behov och kunna fastställa en kravspecifikation. Syftet med fas 1 är därmed att utöka författarens förkunskaper genom att införskaffa primära och sekundära data samt att analysera resultaten av tidigare utredningar. Med att genomföra en problemformulering kan även studiens avgränsningar avgöras. (Mälardalens Högskola, 2014)

Litteraturstudie

En litteraturstudie ligger till grund för en ökad förståelse inom de olika områden som kopplas till projektet. Områden som industrirobotar, robotapplikationer, gjutning med armeringsjärn, tillverkning av armeringsbur är några av dessa.

Förstudie

För att öka förståelse för problemet krävdes en förstudie där flera ostrukturerade och semistrukturerade intervjuer med uppdragsgivaren gjordes samt informationshämtning från Skanskas databas. Tidigare undersökningar och simuleringar analyserades för att få begrepp om hur den tänkta processen såg ut och de givna begränsningar som resulterats från tidigare studier. Med den information som hämtats kunde även beräkningar utföras för att ha möjlighet att uppskatta kraften för att genomföra de olika momenten i verktyget. Gemensamt med Robotdalen och den förstudie som gjorts, kunde avgränsningar för kommande studie bestämmas.

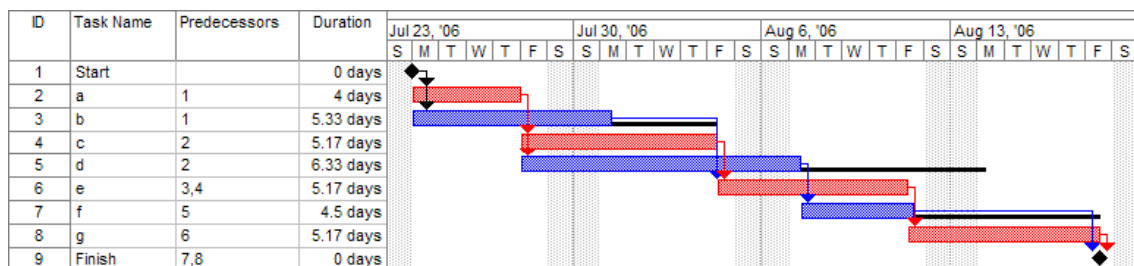
2.4.2 Fas 2 – Konceptgenerering

Projektplanering

Enligt Ulrich & Eppinger (2012) ska en detaljerad planering utföras som tydligt visar strategin för utvecklingsprocessen. För att minimera tiden i utvecklingsprocessen identifieras även de resurser som kan utnyttjas där schemat och strategin anpassas efter dessa.

Gantt-schema

Ett traditionellt verktyg som ofta används för att presentera tidsplanen för de aktiviteter som ska utföras i projektet, är Gantt-schemat. Gantt-schemat innehåller en horisontell tidsplan där ett start- och slutdatum sätts för att skapa en linje som visualiserar den planerade tiden (*se figur 4*). Det finns flera olika sätt att presentera ett Gantt-schema på där de flesta innefattar en tidsplan samt en utförd tid för att visa om aktiviteten är slutförd. Med hjälp av ett Gantt-schema kan även kopplingar mellan aktiviteter tydliggöras för att se vilka som ska avslutas innan nästa kan påbörjas. Den klargör även vilka aktiviteter som är kritiska dvs. den längsta kedjan som styr projektets avslutsdatum. (Ulrich & Eppinger, 2012)



Figur 4 - Exempel på Gantt-scehma (Example Gantt Chart, 2014)

Omvärldsanalys

Genom att söka extern information från eventuella konkurrenter menar Ulrich & Eppinger (2012) är viktigt för att bredda grunden till konceptutvecklingen. Då uppgiften består av en lösning som tidigare inte finns på marknaden kan inte produkten jämföras med primära konkurrenter, dock kan information hämtas i syfte att öka kunskapen inom specifika moment av produkten.

Kravspecifikation

En kravspecifikation presenterar i mätbara värden *vad* produkten ska utföra, istället för att förklara *hur* produkten ska uppnå kundens krav. Detta görs för att tydligare kunna utveckla en produkt genom att minska marginalerna i kravspecifikationen. En tidig "mål"-specifikation sätts i processen för att styra projektet och förfinas sedan till den slutliga kravspecifikationen när produktens slutkoncept har valts. Anledningen är för att kraven som ställs beror på konceptet och författaren kan behöva avväga mellan önskvärda egenskaper av produkten (Ulrich & Eppinger, 2012). Den slutliga kravspecifikationen har som syfte att användas som en checklista till resultatet där konstruktionen kan jämföras mot de krav som ställts.

Funktionsanalys

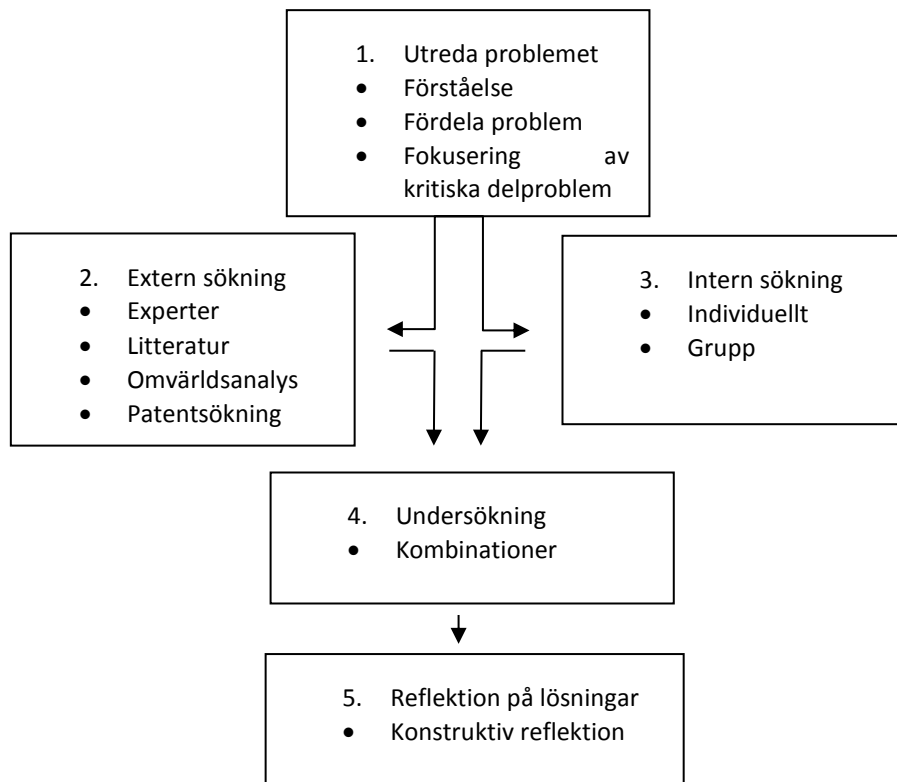
För att ha möjlighet att påbörja konceptgenereringen måste problemställningarna utredas. Detta har betydelse för att få kunskap om vad det är för problem som ska lösas samt vilken/vilka funktioner som produkten ska bestå av (Ulrich & Eppinger, 2012). I en funktionsanalys upplyses funktionerna som ska möjliggöra produktens uppgifter istället för att beskriva en egenskap eller en tänkt lösning. Det är alltså viktigt att man förklarar *vad* produkten ska göra istället för *hur* (Bark, Verb och Substantiv för funktionsanalys vid produktutveckling, 2009). Funktionsanalysen formades genom att identifiera vilka funktioner som motsvarade kravspecifikationen till produkten. Funktionerna delas upp i HF(huvudfunktion), DF(delfunktion) och SF(stödfunktion) (Bark, Funktionsanalys, 2009). Funktionsanalysen låg till grund för kommande konceptgenerering och användes för att tydliggöra problematiken i uppgiften.

Konceptgenerering

Målet med en konceptgenerering är att grovt undersöka koncept som kan möta kundens krav och har gjorts med en metod, *A Five-Step Method* beskriven av Ulrich & Eppinger (2012). Konceptgenereringen innehåller en blandning av extern sökning, intern problemlösning inom företaget och en utforskning av alla delar av lösningarna som genererats (Ulrich & Eppinger, 2012). Den interna genereringen av problemlösning utfördes med hjälp av *brainstorming* i grupp. De personer som deltog var författaren, handledare, programmerare, robotsimuleringsansvarig, forskningsassistenter och personer från andra delprojekt.

A Five-Step Method

En metod som beskrivs av Ulrich & Eppinger är *A Five-Step Method* som delar upp ett komplext problem till flera mindre delproblem (se figur 5). Genom en intern och extern sökning kan lösningar på delproblem identifieras och därefter kombineras till en komplett lösning. I den slutliga fasen reflekterar de iblandade om möjligheter för tillämpning och validitet av resultatet. Processen sker oftast iterativt som anpassas efter olika projekt och människor (Ulrich & Eppinger, 2012).



Figur 5 - A Five-Step Method, beskriven av Ulrich & Eppinger (2012)

Brainstorming

Den interna sökningen är till för att utnyttja personliga och arbetsmässiga kunskaper där kreativitet används för att åstadkomma lösningsförslag. Ofta används en metod som kallas brainstorming där syftet är att generera väldigt många idéer och utveckla dessa. Fyra riktlinjer som är användbara för att förbättra genereringen både individuellt och i grupp förklaras av Ulrich & Eppinger (2012).

1. Uteslut bedömning
För att kunna ha möjlighet att generera maximalt med idéer måste bedömning uteslutas. Detta gör att man istället kan föreslå förbättringar som bidrar till fler idéer.
2. Generera många idéer
De flesta experter menar att desto fler idéer en grupp genererar, ju större chans är att man uppnår hela lösningsfältet. En idé kan anses som en stimulans till fler idéer, vilket gör att även fler kan genereras.
3. Välkomna idéer som kan anses som omöjliga
"Omöjliga" idéer är mycket värdefulla då de bidrar till att en grupp tänker utanför ramarna. I många fall finns enkla justeringar som gör "omöjliga" idéer till möjliga vilket kan vara svårt att se individuellt, därför bör även dessa iakttas.
4. Använd grafiska och fysiska medier
Ofta kan det vara svårt att göra en förklaring av en idé med endast ord. Då det är väldigt viktigt att vara tydlig med sin idé bör andra medier även användas. Detta kan vara exempelvis lera, skum, kartong, CAD-program, eller andra 3-dimensionella medier.

Konceptval

Tidigare i processen identifieras flera kundkrav och med olika metoder kan koncept genereras. Konceptval är en process som utvärderar koncepten mot kundens behov och fastställda krav genom att jämföra styrkor och svagheter för att sedan utse ett mindre antal för vidare utveckling (Ulrich & Eppinger, 2012).

Pughs matrix

Enligt Ulrich & Eppinger (2012) är Pughs matrix ett utmärkt verktyg för att snabbt utvärdera koncept. Den är uppbyggd med kriterier av produkten, samt en viktning (1-5) som klargör hur viktig varje kriterier är. Genom att ha en referens, ofta en konkurrens eller tidigare lösning, kan de alternativa lösningarna bedömas på ett simpelt sätt. De alternativa lösningarna kan värderas genom att bedöma om kriterierna är lika (0), bättre (1) eller sämre (-1) än den givna referensen. Resultatet visar en summa av bedömningen multiplicerad med viktningen (*se figur 6*).

Criteria	Optional Importance Weighting	Current Solution	Alternative #1	Alternative #2
Effectiveness	5	0	1	1
Availability of Resources	3	0	0	1
Support from Business	2	0	0	1
Long Term Benefit	2	0	1	0
Time to Implement	4	0	-1	0
Ease to Implement	1	0	0	0
Cost of Implement	5	0	-1	-1
Totals		0	-2	5

Figur 6 - Exempel på Pughs matrix (What is a Pugh Matrix?, 2016)

Resultatet av Pughs matrix tillsammans med kravspecifikationen samt diskussioner med uppdragsgivarna låg till grund för det beslut som gjordes för vidare utveckling av koncept.

2.4.3 Fas 3 - Design på systemnivå

System- och detaljutveckling

I denna fas inkluderas uppbyggnaden av produkten där konceptet delas upp i mindre delsystem och komponenter. Den preliminära uppbyggnaden av huvudkomponenterna bestäms samt hur de förhåller sig till varandra och därmed krävs beräkningar för att ha möjlighet att göra dessa komponentval.

Datorstödd beräkning

För att ha möjlighet att välja komponenter så krävdes en detaljerad beräkning som utfördes med hjälp av ett verktyg som heter Motion Study i programmet SolidWorks. Motion Study är ett grafiskt simuleringsverktyg för sammanställningar där man har möjlighet att iaktta delarna under rörelse. Under en studie kan även programmet animera rörelsen för att se hur alla delar förhåller sig med varandra. Under studien kunde motorer och linjära enheter tilläggas i modellen och låta programmet analysera effekterna från enheterna (Introduction of Motion Studies, 2016).

2.4.4 Fas 4 - Design på detaljnivå

Design på detaljnivå inkluderar kompletta specifikationer av geometri, material och toleranser av alla unika komponenter samt identifiering av eventuella standardkomponenter som ska beställas. I denna fas fastställs även ritningar och eventuella optimeringar kan göras (Ulrich & Eppinger, 2012).

Datorstödd optimering

Med hjälp av FEM-analyser kunde material och konstruktion fastställas. Programmet som använts var SolidWorks med ännu ett verktyg som möjliggör dessa slags analyser, SolidWorks – Simulation. SolidWorks-tillägget kan effektivt utvärdera och beräkna produktens konstruktion i flera olika fysiska scenarier. Den möjliggör beräkningar på exempelvis produktens mekaniska hållbarhet, säkerhetsfaktorer, förflyttningar, töjningar, egenfrekvenser, värmeförflyttning etc. Med hjälp av Simulation kan även optimeringar genomföras för vikt, vibration, eller instabilitet baserat på fysiska eller geometriska parametrar. (Simulation, 2016)

TEORETISK REFERENSRAM

I kapitlet beskrivs den teoretiska referensramen som krävdes för arbetet. För att införskaffa kunskap inom områden inom dels robotik samt armeringshantering krävdes en undersökning som presenteras i detta kapitel.

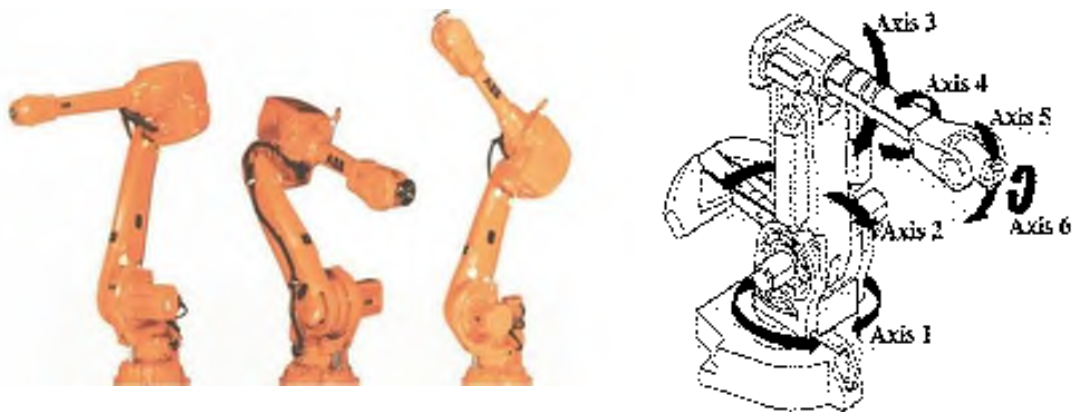
2.5 ABB Industrirobotar

ABB's industrirobotar används internationellt och har idag ca 160 000 i drift. Roboten har fördelen att utföra ett tungt arbetsmoment med en sådan hög hastighet och precision som inte en människa klarar av. Detta har inneburit stora fördelar för tillverkare som kan höja standarden på produkter på en mindre tillverkningsstid samt förbättra arbetsförhållanden för de anställda. I flera tusentals robotinstallationer har kunden haft möjlighet att öka produktionen och kvaliteten samt minska stillestånd, driftkostnader och personal (ABB, 2016).

2.5.1 IRB 4600

IRB 4600 är en industrirobot från ABB och är känd för sin långa räckvidd, sitt kompakta utförande samt sin låga vikt. Roboten har alla de omtalade funktioner som de tidigare ABB-robotarna, den bästa precisionen och rörelsekontrollen på marknaden men har utöver detta en ökad räckvidd och flexibilitet. Dess strama densitet och utrymmessnåla fotfästet gör att man kan få ut det mesta utav arbetsytan och har dessutom en hög nyttolast i jämförelse med liknande industrirobotar.

Roboten är flexibel och är speciellt anpassad för att kunna monteras på olika sätt, såsom på golv, i vinkel och även hängd (ABB, 2016). Industriroboten har 6 axlar som möjliggör en avancerade körningar och gör att den kan komma åt föremål i snäva områden (*se bilaga 1*).



Figur 7 - Industrirobot från ABB, IRB 4600 samt redovisning för robotens axlar (ABB, 2016) (Robot Movement, 2011)

2.5.2 Verktgsväxlare och Svivel

När en robot skall ha möjligheten att utföra flera arbeten från samma position och under samma körning så används ofta en verktgsväxlare. En verktgsväxlare har samma funktion som en universalkoppling som har möjligheten att fästas på flera verktyg. Sviveln som är monterad på en robotarm kan sedan sättas samman med verktgsväxlaren utan att stanna körningen för att byta verktyg (*se bilaga 2*).



Figur 8 - Verktgsväxlare med svivel

2.5.3 Applikationer inom pneumatik & elektronik

Användningen av applikationer med pneumatik och elektronik har båda många för- och nackdelar. När valet av komponent ska genomföras finns flera faktorer som ska stå i grund för det valet som görs. Elektriska enheter används ofta för att uppnå hög precision som inte de pneumatiska applikationerna klarar men är långt ifrån den enda faktorn som har betydelse. Enligt Bob Kral, Bimba Manufacturing Company, behövs det en utredning när valet av pneumatiska och elektriska enheter ska utföras. I valet görs en undersökning för prestanda, komponentkostnader, systemkostnader och produktivitetsvinster.

Pneumatiska applikationer ger en hög kraft samt hastighet för en låg kostnad och har ett litet utförande i jämförelse med elektriska enheter (Greenfield, 2012). Användningen av luft anses vara även vara behagligare än elektronik i applikationer då slangbrott inte skapar lika omfattande problem som ett kabelbrott². Den pneumatiska enheten som är betydligt billigare än den elektriska har dock ofta högre underhålls- och driftkostnader.

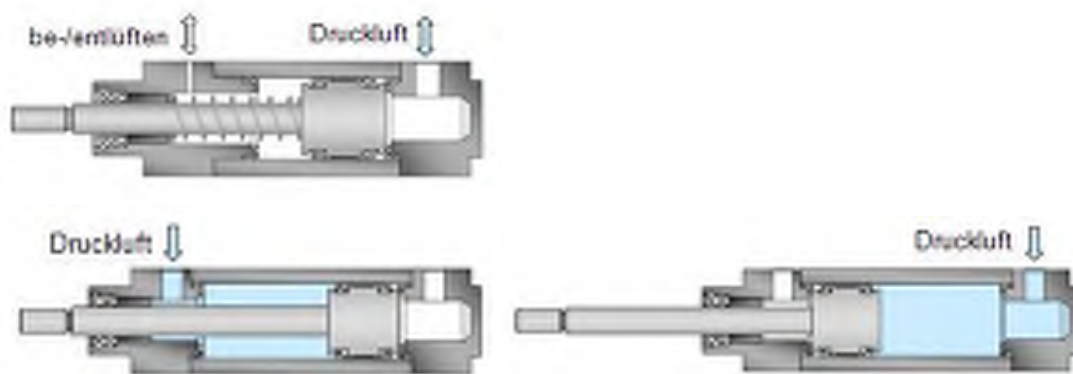
Den elektriska enheten är bistår med en högre precision när det gäller kontroll och positionering i jämförelse med pneumatiska enheten och har dessutom ofta lägre driftkostnader. När det gäller att reparera eller byta komponenter i den elektriska enheten blir även kostnaden lägre än hos den pneumatiska. (Greenfield, 2012)

² Josef Holmner, Robotdalen

Pneumatiska cylindrar

Pneumatiska cylindrar är enheter som utför en rörelse genom användningen av lufttryck. Cylindrarna finns i olika utföranden och har olika funktioner för diverse tillämpningar men endast cylindrar med kolvstång studeras i denna uppgift.

Cylindrar med kolvstång är uppdelad i två olika funktioner, enkel- och dubbelverkande cylindrar. Enkelverkande cylindrar har endast en luftingång som därmed kan förflytta kolvstången i en riktning. Kolvenstången går till ursprungsläge när lufttrycket är inaktivt genom en fjäder som trycker stången tillbaka. Dubbelverkande cylindrar har möjligheten att förflytta kolvstången i båda riktningar genom att ha två luftingångar. Förflyttningen av kolvstången dirigeras med lufttrycket för varje ingång (se figur 9).



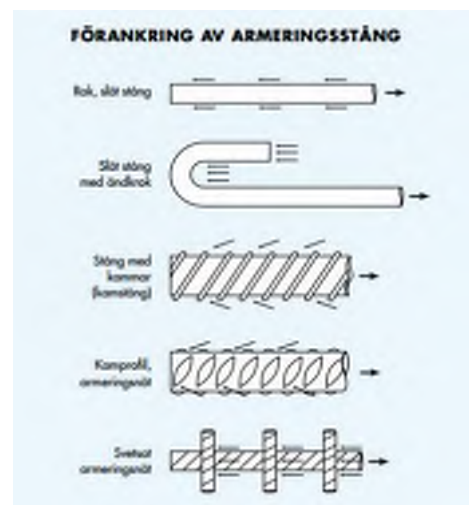
Figur 9 - Enkel- och dubbelverkande pneumatiska cylindrar

2.6 Armeringsjärn

Armeringsjärn används för att öka hållfastheten hos konstruktioner, speciellt betong. Den tar upp drag-, tryck- och skjuvspänning och har förmågan att fördela tryckpåkänningen för att göra konstruktionen starkare. På grund av detta har konstruktionen möjlighet att bli mindre och därmed volymen betong reduceras. Möjligheterna med stål är stora eftersom egenskaperna är beroende av dess sammansättning. Man kan ändra kolhalten i stålet för att påverka segheten och hårdheten men kan även legeras för att åstadkomma andra speciella egenskaper.

Armeringsjärn finns i olika utföranden och har stora betydelser för vidhäftningen i betongen. Ofta har armeringen kammar som en grovhet på ytan av just den anledningen men kan även böjas för att få en slags krok som även höjer vidhäftningen.

Armeringen består utav varmvalsat, seghärdat stål och kan tillverkas i raka längder, bearbetad eller på rulle. (Begroup, 2016)



Figur 10 - Förankring med armeringsstäng (Begroup, 2016)

2.7 Manuell tillverkning av armeringsbur och gjutning

Metoden för tillverkningen av armeringsbur beror helt på konstruktionen. Är det en mindre konstruktion används inte samma metoder som hos en större som sträcker sig över en längre tid.



Figur 11 - Manuell tillverkningsprocess av armeringsbur (Begroup, 2016)

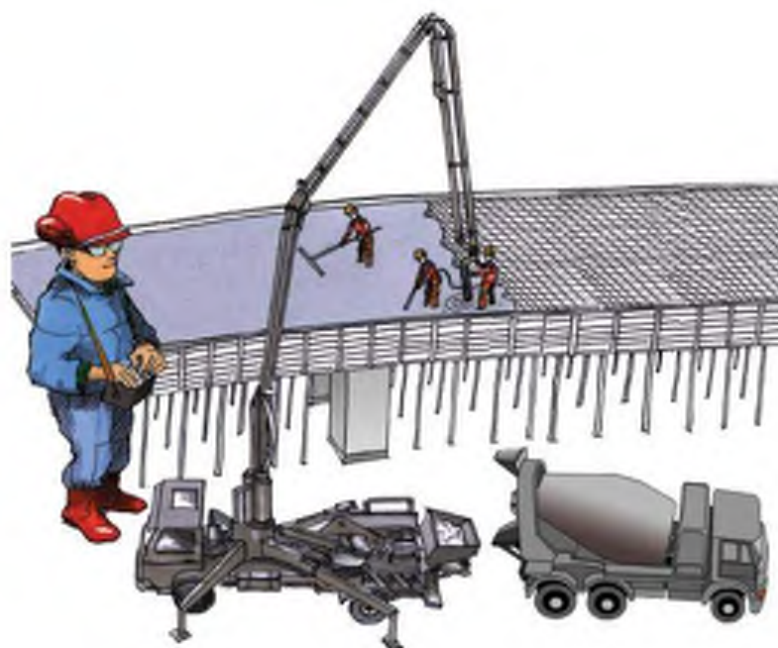
Det finns metoder som innebär egen tillverkning av armeringsdetaljer där det mesta sker för hand av personal på byggområdet. Andra metoder är att transportera färdiga armeringsdetaljer från fabrik till byggområdet som sedan kan monteras ihop av personalen. Denna metod minskar hanteringen av armering och förbättrar därmed arbetsförhållanden för arbetarna. Vilken metod som används kan exempelvis handla om kostnader, personella resurser, kvalitet, byggområdesyta och tillgång till utrustning m.m.

För att skapa en bur så monteras armeringsjärn ihop manuellt enligt en ritning som utformats av en konstruktör. Armeringen kan monteras ihop genom att svetsa ihop järnen eller genom det vanligare sättet, najning (Begroup, 2016). När man najar så binds en tråd runt fästpunkten och på så sätt kan armeringen surras fast med varandra (Byggkatalogen, 2014). Har inte armeringen monterats direkt i formen så förflyttas buren till formen med hjälp av en lyftkran.



Figur 12 - Najtång och najtråd (Mer isolering och armering, 2010)

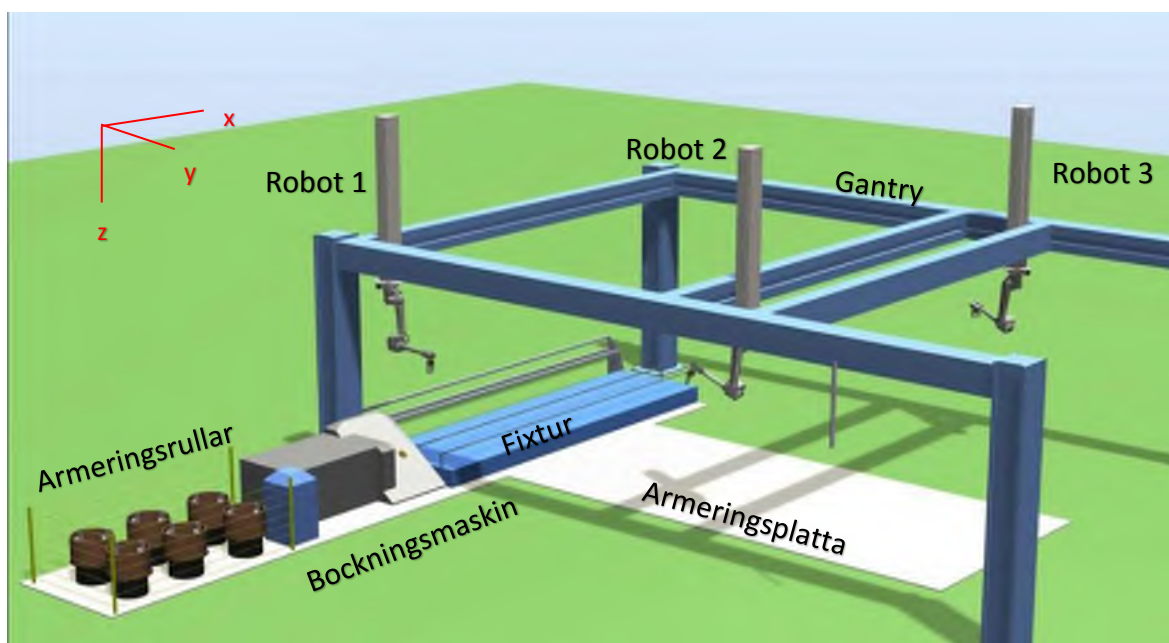
Gjutningen beror mycket på vilken miljö konstruktionen skall hantera. I vissa fall ska konstruktionen klara av stora temperaturförändringar och ha en längre livslängd än andra. Detta ställer därefter större krav på gjutningen av betong. Vid gjutningen beaktas faktorer som väderlek, temperaturförhållanden och betongmassans egenskaper för att sedan kunna bestämma en lämplig tjocklek. Betongen fraktas till byggområdet i flytande form med hjälp av roterbilar. Ofta kan betongen pumpas direkt från roterbilen (se figur 13) till formen, men kan även lyftas med hjälp av en kran. (Viktor & Victor, 2010)



Figur 13 - Illustration av gjutning av betong på bro (Svenskbetong, 2014)

2.8 Automatisk tillverkning av armeringsbur

I den automatiska tillverkningen av en armeringsbur är tanken att endast en konstruktör ska krävas för att utföra framställningen av en bur. Konstruktören ska kunna rita upp den tänka konstruktionen och sedan starta en körning, där resten av aktiviteterna ska skötas automatiskt.



Figur 14 - Visualisering av den tänkta automatiska tillverkningsstationen (bild tagen från Robotstudio)

För att tillverka en armeringsbur krävs en station som kan utföra de olika aktiviteterna. I stationen finns det en uträttnings- och bocknings-maskin, fixtur, robotar som är monterade på en gantry och en platt yta för armeringsburen att stå på.

Gantryn gör att roboten kan röra sig utöver sin egen räckvidd eftersom den har 3 axlar som kan förflytta robotarna. Gantryn har möjlighet att förflytta roboten i alla tre led och har ha storleken 3,7m i z-led, 12m i x-led och även 19m i y-led (se figur 14)³.

Den tänkta processen är uppdelad i flera faser där olika aktiviteter kommer att genomföras i varje fas för att tillverka buren.



Figur 15 - Automatiska tillverkningsprocessen

Bockning

Armeringen transporteras till byggnadsstationen via rullar, även kallade "coils". När stationen ska lägga ett armeringsjärn så meddelas bockningsmaskinen vilken dimension, längd och bockning som skall utföras. Bockningsmaskinen rätar ut och bockar armeringen efter informationen den fått och släpper sedan ned den på fixturen.

Fixtur

För att kunna lokalisera armeringsjärnet finns en fixtur. Armeringsjärnets position är odefinierbar när den matas ut från bockningsmaskinen. Detta leder till att en fixtur med en given position för armeringsjärnet krävs för att roboten ska ha möjlighet att hitta det. Genom att varje unikt armeringsjärn har en given position i fixturen så kan roboten med säkerhet hämta järnet på rätt ställe.

Förflyttning

Armeringsjärnet ska därefter förflyttas till den position där den ska fästas. Detta görs genom att tre robotar med hjälp av olika gripdon tar tag i järnet och gemensamt med gantryn transporterar järnet till given plats. I denna fas krävs det även att armeringsjärnet kan rotera för att kunna placeras på alla olika positioner.

Sammansättning

Armeringsjärnet monteras ihop med andra järn för att bibehålla sin position. Detta görs genom att svetsa eller att naja ihop armeringsjärnen. Roboten använder sig utav en verktygsbytare vilket möjliggör ett byte till ett najning- eller svetsverktyg som sedan utför hopsättningen. Sammansättningen ska endast hålla samman buren under tiden den inte är gjuten, den har alltså ingen avsikt att öka bärförmågan i konstruktionen.

³ Josef Holmner, Robotdalen

Transportera bur

När armeringsburen är tillverkad så är den automatiska processen slutförd. I detta skede kan armeringsburen lyftas med en lyftkran från armeringsplattan till gjutformen (se figur 16).



Figur 16 - Illustration av transporterering av armeringsbur från stationen (bild tagen från Robotstudio)

3 TILLÄMPAD LÖSNINGSMETODIK

I kapitlet summeras resultatet av den metodik och verktyg som beskrivits i kapitel 2.

3.1 Fas 1 – Problemformulering

I problemformuleringen granskades alla de faktorer som gav kunskap om problemet. Med hjälp av uppdragsgivarna kunde mycket information hämtas angående den tänkta processen när det gäller industrirobotar, tillgångar, armeringsplaceringar, tänkta robotrörelser etc. (se kap. 2). Även vissa grova beräkningar gjordes för att få övergripande kännedom om hur stora krafter som skulle behandlas. För att även få en bredare inblick om vad som finns på marknaden och tidigare lösningar på diverse funktioner som eventuellt kunde utnyttjas gjordes en omvärldsanalys.

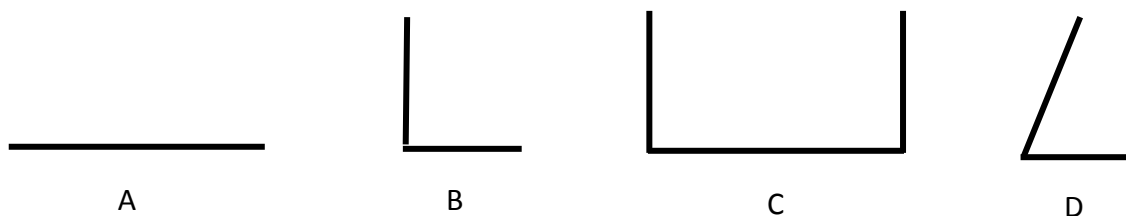


Figur 17 - Illustration för problemformuleringens position i produktutvecklingsprocessen

3.1.1 Den tänkta tillverkningsprocessen

Typer av armeringsjärn och bockningar

De armeringsjärn som kommer att hanteras är dimensioner från 12 till 25 mm i diameter och har olika utformningar. Det finns bockningar i 4 utföranden, så kallade A, B, C samt D-bockningar där längderna på alla sidor varierar (se figur 18).



Figur 18 - De olika bockningarna av armeringsjärn

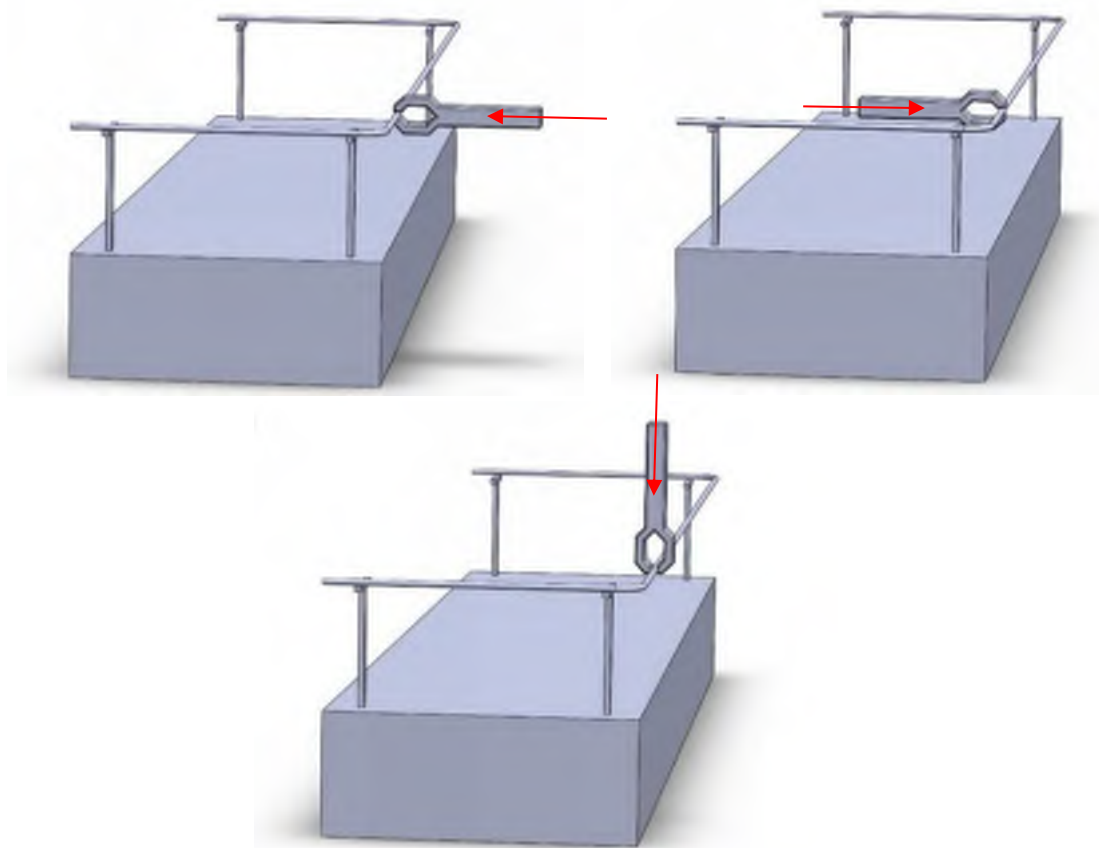
Positionering av armeringsjärn i den specifika armeringsburen

Armeringskonstruktionen har totalt 370 stycken armeringsjärn som i 12 steg fulländar buren. Robotarna börjar med att placera ut distanser på marken som de första armeringsjärnen ska ligga på. Efter detta börjar armeringsjärnen läggas ut och sammanfogas med varandra. I bilaga 3 illustreras de olika stegen som robotarna ska behärska och därmed ligger till stor grund för den kravspecifikation som fastställts.

Orientering av armeringsjärn

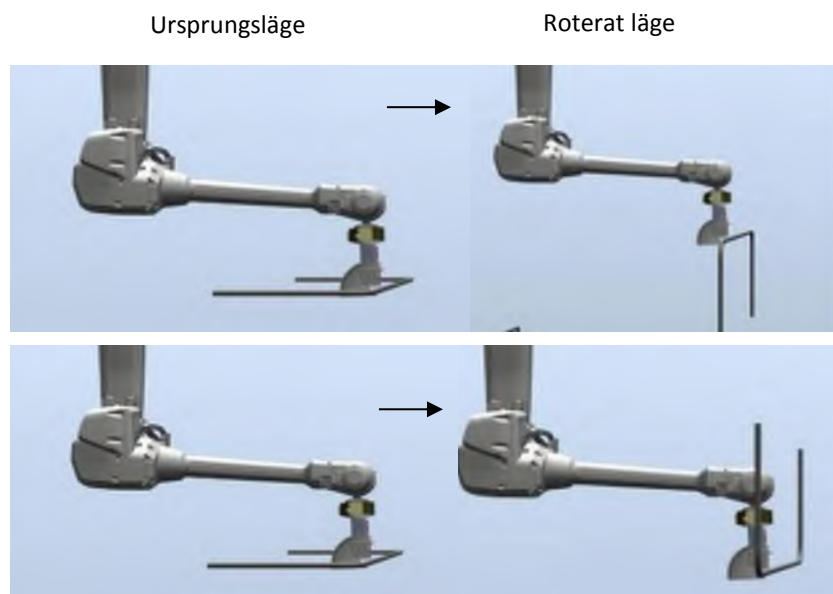
För att roboten ska ha möjlighet att göra alla steg i bilaga 3 måste ett verktyg kunna rotera armeringen minst 90 grader utöver robotens rotationsvidd. Detta beror på att alla bockade armeringsjärn har en specifik riktning i fixturen. Roboten måste därför ha möjlighet att vända armeringsjärnet sammanlagt 180 grader för att kunna placera järnet på alla positioner i buren. För att roboten ska kunna rotera armeringsjärnet 180 grader så måste ett verktyg utföra minst halva den rotationen.

Det begränsade utrymmet bidrar till höga krav på robotens positionering när armeringsjärnet ska bibehållas på sin position i armeringsburen. Robotens riktning vid hämtning av armeringsjärn påverkar vilket håll roboten kommer att ha efter rotation. Detta gör att det även ställs höga krav på vilka riktningar roboten ska ha möjlighet att hämta armeringsjärnet från fixturen. Genom att analysera de tänkta rörelserna i Robotstudio kunde tre riktningar för verktyget fastställas för hämtning från fixtur. Detta gör att verktyget begränsas utefter fixturens utformning. (se figur 19 pilarna visar riktningen på robotens infästning).



Figur 19 - Illustration för hämtningspositioner från fixtur

Då verktyget inte ska vara en begränsande faktor när det gäller rotering av armeringsjärn måste alla tre hämtningspositioner vara möjliga. Industrirobotens 6:e axel (se figur 7) kan rotera verktyget vilket möjliggör en 90 graders roteringsvidd mot båda riktningar. Axel 6 kan alltså vända verktyget "upp & ner" för att en rotering i motsatt håll blir genomförbar (se figur 20).

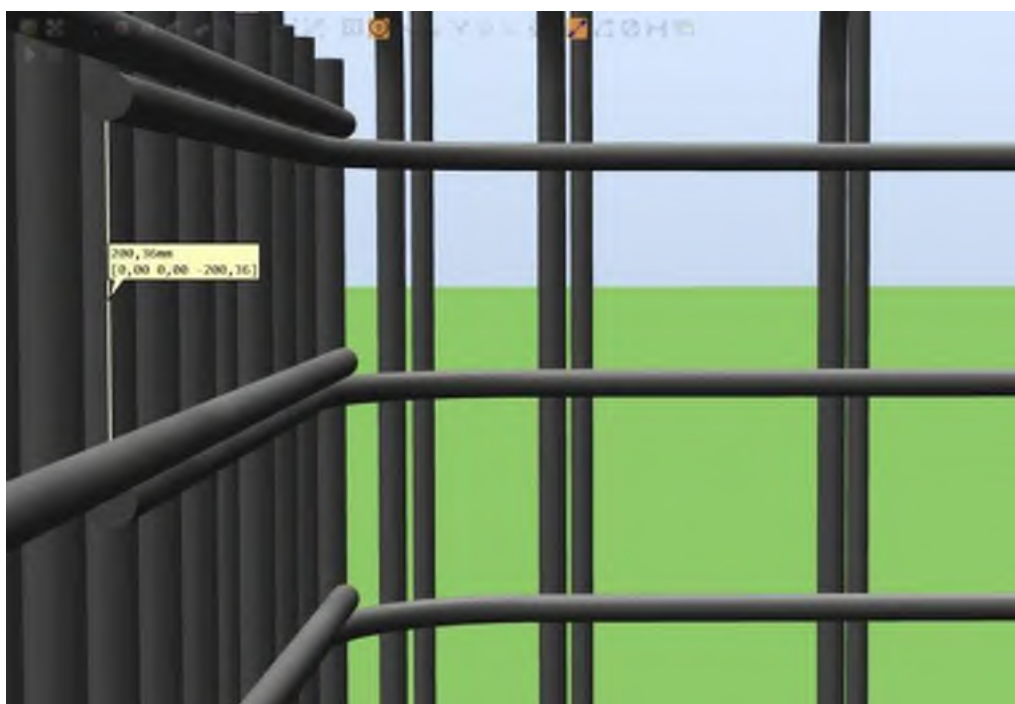


Figur 20 - Robotens möjlighet att rotera armeringsjärn i två riktningar presenteras

Har roboten en position ovanför armeringsjärnet kan alltså en rotation vara möjlig både uppåt och nedåt beroende på vilken position verktyget har i robotens axel 6.

Mätning i Robotstudio

Genom att studera robotsimuleringen i Robotstudio kunde mätbara värden fastställas som låg till grund för verktygets geometri. Med flera diskussioner med den anställda på robotdalen som utformat simuleringen hittades olika extremvärden som kunde sammanfattas i kravspecifikationen. Nedan i figur 21 illustreras hur mätningen av utrymmet för extremfallet i det roterade läget, 200 mm. Kravet på verktygets storlek kan ses i kap 3.2.4.



Figur 21 - Utrymmesmätning i Robotstudio

Beräkningar

I vissa moment krävs det att roboten tar grepp om den långa sidan av ett C-järn (se figur 19). Detta är för att roboten inte har tillräckligt med utrymme när armeringsjärnet ska placeras i vissa positioner. Eftersom armeringsjärnet ska ha möjlighet att lyftas horisontellt från fixturen och därefter kunna rotera krävs det att gripdonet kan hantera momentkraften som skapas av järnets kortsidor⁴.

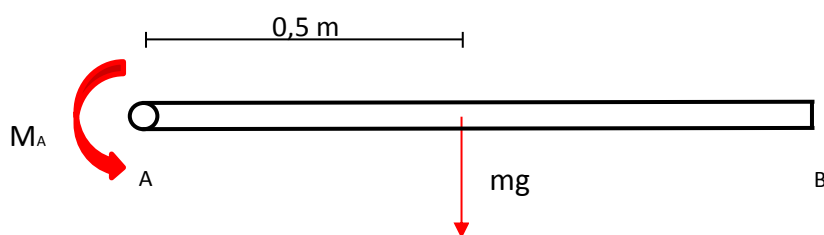
För att ha möjlighet att beräkna momentkraften som uppstår behövdes ett extremfall av armeringsjärnets utformning och diameter. Det specificerade extremfall som blev fastställt var ett armeringsjärn med C-bockning där kortsidorna var 1 m vardera samt 25 mm i diameter⁵ (se figur 22).



Figur 22 - Extremfallet där ett C-bockat armeringsjärn beräknas

Tabell 1 - Information om armeringsjärn

Datainsamling för armeringsjärn	
Diameter	25 mm
Stålsort	K500C-T
Massa	3,85 kg/m



Figur 23 - Krafter som påverkar armeringsjärn

$$m = 3,85 \cdot 1 = 3,85 \text{ kg}$$

$$M = 0,5 \cdot mg = 0,5 \cdot 3,85 \cdot 9,82 = 18,9 \text{ Nm}$$

⁴ Josef Holmner, Robotdalen

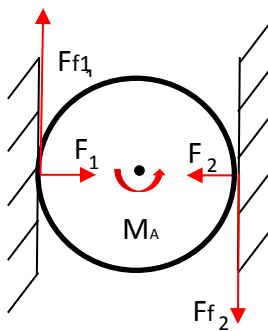
⁵ Josef Holmner, Robotdalen

$2 \cdot M = 37,8 \text{ Nm}$ (Eftersom C-järnet har två kortsidor blir momentkraften dubbelt så hög)

Rotationsfunktionen krävde en momentkraft som måste överstiga 37,8 Nm för att resultera i en rörelse.

En förenklad beräkning genomfördes för att uppskatta kraften som krävdes för att ett armeringsjärn skulle bibehållas i horisontell riktning. Då friktionskoefficienten är okänd och ytan inte är helt cirkulär på ett armeringsjärn är beräkningen förenklad, men syftet är att få förståelse om approximativt vilka krafter som verktyget måste hantera.

I beräkningen förekommer två ytor som med en kraft pressas mot armeringsjärnet vilket illustreras i *figur 24*. Samma beräkning kan enligt Newtons tredje lag användas för att bedöma kraften när en yta pressar och andra ytan är stationär på grund av normalkraften från den stationära ytan.



Figur 24- Friktionskrafter som påverkar armeringsjärnet

$$M_A = F_{f1} \cdot r + F_{f2} \cdot r$$

$$F_{f1} = |F_1| \times \mu_s$$

$$F_{f2} = |F_2| \times \mu_s$$

$$M_A = 2(|F| \cdot r \cdot \mu) \quad (\text{eftersom } |F_1| = |F_2| = |F|)$$

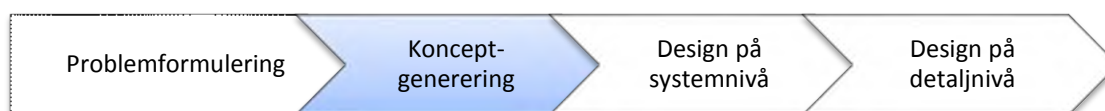
$$r = 0,0125 \text{ m}$$

$$2M = 37,8 \text{ Nm}$$

$$|F| \cdot \mu = \frac{2M_A}{2r} = \frac{37,8}{2 \cdot 0,0125} = 1512 \text{ N}$$

Kraften som krävs är 1512 N när inte friktionskoefficienten är inräknad. För att tydliggöra friktionskoefficientens innebörd så har rent och torrt stål mot stål 0,5-0,8 (Friction & Frictions coefficients, 2016).

3.2 Fas 2 – Konceptgenerering



Figur 25- Konceptgenereringens position i produktutvecklingsprocessen

3.2.1 Gantt-schema

Författaren förberedde en grov planering genom att göra ett Gantt-schema där varje aktivitet planerades. Gantt-schemat baserades på den uppskattade arbetstid som krävdes för att genomföra den metodik som tidigare beskrivits i kap. 2 samt de krav som ställdes från uppdragsgivaren. Författaren tog hänsyn till den arbetstid som är avsedd för ett examensarbete för en person, vilket är 800 timmar. Gantt-schemat som utnyttjades i projektet kan iaktas i *bilaga 4*.

3.2.2 Omvärldsanalys

Uppgiften innefattar en produkt som tidigare inte använts i en automatiserad hantering av armeringsjärn. Detta medför att konkurrenter till den specifika robotapplikationen inte existerar, men produkter i den manuella processen fortfarande kan studeras. Problemet delades in i ett antal mindre delproblem och därmed kunde fler funktioner och tidigare lösningar analyseras.

En bred undersökning genomfördes externt där tidigare verktyg, robotapplikationer och flertal mekaniska lösningar till varierande problem analyserades. Enligt Ulrich & Eppinger (2012) är utredningen av existerande lösningar inom projektets område en ledande faktor för ett effektivt arbete i konceptgenereringen.

Gripfunktioner

Ett antal möjliga gripfunktioner analyserades och viktiga faktorer ställdes mot varandra för att tydliggöra för- och nackdelar. Eftersom lösningarna har olika huvuduppgifter behövdes dess huvudfunktion antas under granskningen.

Standardgripdon

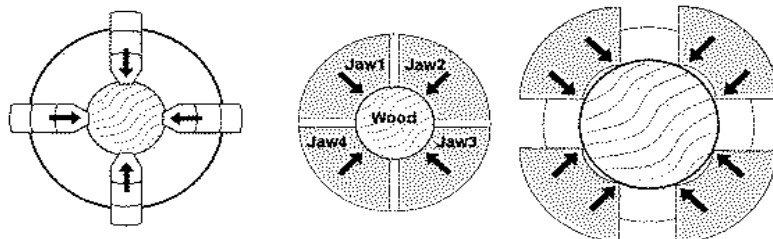
Det vanligaste när det gäller gripningsapplikationer inom automation är standardgripdon. De finns i många utföranden och har olika uppgifter men det gemensamma, huvudsakliga uppdraget är att ha grepp om olika föremål vilket är en av delfunktionerna. Några av standardgripdonen hos företaget FESTO är parallell-, trepunkts-, radiell- och vinkel-gripdon. Mer information om varje gripdon presenteras i *bilaga 5*.



Figur 26 - Standardgripdon från FESTO (Gripper, 2016)

Koncentriska funktioner

En intressant funktion som ofta används vid universella tillämpningar är koncentriska funktioner, dvs. flera föremål som rör sig mot ett gemensamt centrum. Detta gör att flera dimensioner kan hanteras och arbetsstycket alltid är centrerat i verktyget. Några applikationer har studerats via diverse produktinformationer och patentsökning. Några av produkterna var chuck till en skruvdragare (Wood Magazine, 2016), universella skiftnycklar från LoggerHead Tools (mer från patentet i *bilaga 6*) (LoggerHead Tools, 2016) och hydrauliska, pneumatiska och mekaniska rörkrympare i olika storlekar och modeller (Gates, 2016).



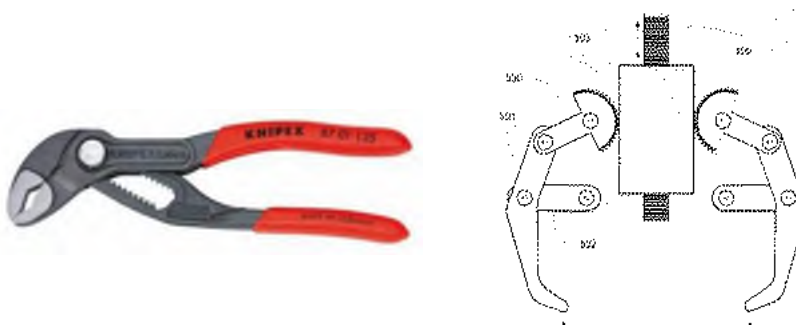
Figur 27 - Förklaring av koncentrisk funktion (Scroll Chucks, 2016)



Figur 28 - Koncentriska produkter (Hose crimping machine - P20HP, 2016) (Taper Mount Heavy Duty Drill Chuck, 2016) (Skövde Ridsport, 2016)

Hävarm

För att minska kraften hos enheten som ska möjliggöra gripfunktionen kan en hävarm utnyttjas. Detta har använts i flera tidigare produkter och lösningar och författaren har analyserat några av dem. Det finns många olika sätt att använda sig utav en hävarmsfunktion men två produkter som studerades var polygripen och en robotapplikation för grepp av kassetter (Google Patent, 2013) (se bilder från patent i *bilaga 7*).



Figur 29 – Polygrip & Robotapplikation för grepp av kassetter (Knipex polygrip, 2016) (Google Patent, 2013)

Elektromagnet

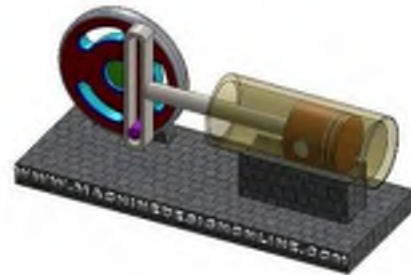
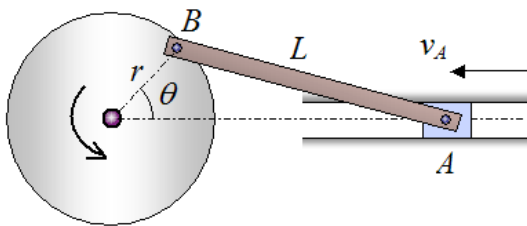
En vanlig tillämpning som används i många områden, från tunga skrotlyft i järnindustrin till små applikationer inom medicinteknik är elektromagneter. Elektromagneter kan ha ett kompakt utförande och erhålla hög lastförmåga (Compotech, 2016).



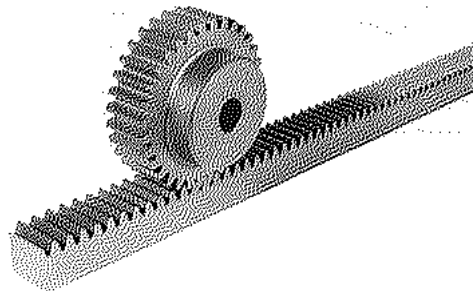
Figur 30 – Elektromagnet (Adams Magnetic Products, 2016)

Roteringsfunktioner

Eftersom ett av uppgiftens delproblem är att rotera armeringsjärn krävdes även en extern informationshämtning av olika funktioner som möjliggör en rotering. Ett större antal roteringsmekanismer analyserades där allt ifrån vanligare applikationer som vevmekanismen (rotation-linjär rörelse) till ovanligare privata konstruktioner. Även olika växlingstekniker undersöktes för att ha kännedom om hur de fungerade och hur de kunde tillämpas för att utöka krafter och omvandla rörelser.



Figur 31 - Linjär-roterande rörelse (Kinematics Problems, 2016) (Scotch yoke Mechanism, 2013)



Figur 32 - Wormgear (Direct Industry, 2016) & kugg med kuggstång (Direct industry, 2016)

Utvärdering av omvärldsanalysen

Eftersom produkterna och lösningarna hade olika problemområden listades för- och nackdelar generellt för varje produkt som kunde påverka uppgiftens resultat. Inget beaktande togs för att verifiera den med högsta/lägsta värdet av egenskaperna (minst vikt, minst storlek m.m.).

Tabell 2 - Utvärdering av omvärldsanalys

Produkt	Fördelar	Nackdelar
<i>Standard gripdon</i>	+ Många varianter + Verifierade tillämpningsområden + Tydliga produktanvisningar + Hög belastningsförmåga	– Storlek – Vikt
<i>Koncentriska lösningar</i>	+ Omfattande tillämpningsområde + Möjligheter att växla kraften + Flera media möjligheter	– Storlek – Komplexitet – Många komponenter
<i>Polygrip</i>	+ Hög belastningsförmåga + Många tillämpningsområden	– Storlek
<i>Kassettgripare</i>	+ Stor utväxlingsförmåga + Anpassbar geometri	– Komplex
<i>Elektromagnet</i>	+ Kompakt + Hög belastningsförmåga	– Medger låg friktionskoefficient
<i>Vevmekanism</i>	+ Möjliggör en anpassbar geometri + Stor utväxlingsförmåga	– Storlek
<i>Wormgear</i>	+ Bidrar till ett mindre konstruktion + Kraftfull + Stor utväxlingsförmåga + Inbyggd låsningsfunktion	– Bidrar till en komplex lösning – Högt toleranskrav
<i>Kugg & kuggstång</i>	+ Bidrar till ett mindre konstruktion + Många tillämpningsområden + Stor utväxlingsförmåga + Möjliggör en anpassbar geometri	– Bidrar till en komplex lösning – Högt toleranskrav

3.2.3 Funktionsanalys

Genom att utforma en funktionsanalys kunde vidare konceptgenerering basera problemlösningen på de funktioner som uppgiften ställer krav på. Uppgiften baseras på problematiken av hanteringen av armeringsjärn, vilket bedöms som huvudfunktion. Huvudfunktionerna, delfunktionerna och eventuella stödfunktioner illustreras i *tabell 3*. Tänkbara kommentarer på funktionerna beskrivs i beteckningarna under funktionsanalysen.

Tabell 3 - Funktionsanalys

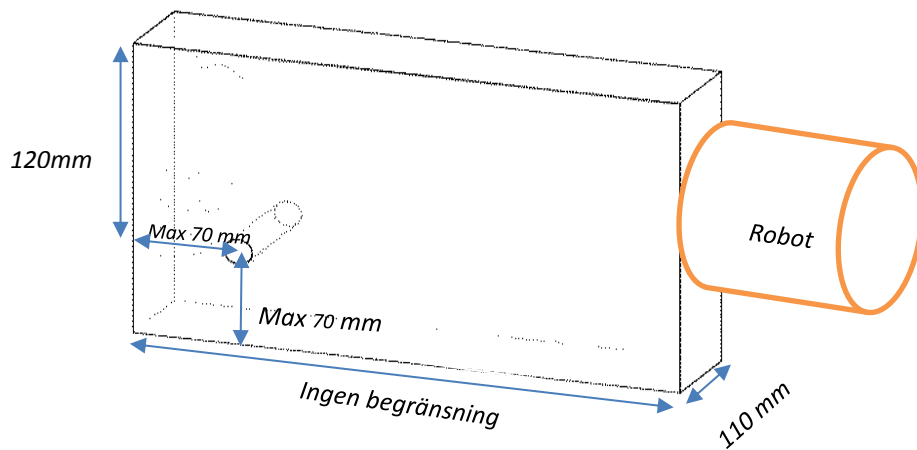
	<i>Funktion</i>	<i>Typ av funktion</i>	<i>Kommentarer</i>
<i>a</i>	Hantera armeringsjärn	Huvudfunktion	
<i>b</i>	Medge grepp	Delfunktion	<i>Greppet ska behålla armeringsjärnet horisontellt</i>
<i>c</i>	Medge rotering	Delfunktion	
<i>d</i>	Skapa fixtur	Delfunktion	<i>Verktyget ska känna till armeringsjärnets koordinatsystem, dvs. att armeringen ska ha en given position i verktyget.</i>
<i>e</i>	Medge låsning i specifika positioner	Delfunktion	
<i>f</i>	Medge förflyttning	Delfunktion	<i>Verktyget ska bibehålla armeringsjärnets position under förflyttning</i>
<i>g</i>	Tåla fukt	Delfunktion	<i>Korrosionsbeständig</i>
<i>h</i>	Medge lyft	Delfunktion	<i>Armeringsjärnet ska ha möjlighet att lyftas från fixturen</i>
<i>i</i>	Förhindra trassel av kablar/slangar	Delfunktion	
<i>j</i>	Underlätta service	Stödfunktion	<i>Service av inre komponenter ska vara möjligt</i>

3.2.4 Kravspecifikation

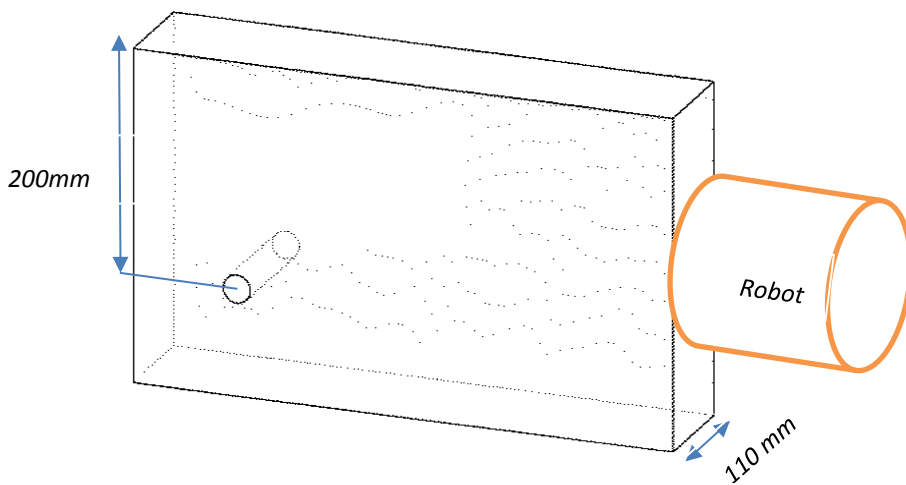
Den tekniska kravspecifikationen som möjliggör hanteringen av armeringsjärn och är vad resultatet baseras på, har utformats utifrån förstudien samt överläggningar med uppdragsgivarna.

Tabell 4 - Kravspecifikation

Prestandakrav		Värde
☐	1. Konstruktionen ska möjliggöra grepp om olika dimensioner	12-25mm
☐	2. Konstruktionen ska klara av att bära armeringsjärn under förflyttning	15kg
☐	3. Konstruktionen ska ha möjlighet att rotera armeringsjärn radiellt	90°
☐	4. Konstruktionen skall kunna hitta samt gripa armeringsjärn inom ett intervall	±5mm
☐	5. Vikten på verktyget (inkl. bärande vikt) får inte överstiga robotens bärkapacitet	40kg
☐	6. Konstruktionen ska anpassas efter fästianordningen på en verktygskopplare, RSP0109.	Ja
☐	7. Konstruktionens bredd ska anpassas efter fixturstationens samt armeringsburens utrymme	< 110 mm i bredd
☐	8. Konstruktionens storlek ska anpassas efter den specifika armeringsbur som tilldelats av Skanska (<i>se figur 33</i>)	< 70 mm under armeringsjärn < 70 mm framför armeringsjärn < 120 mm ovanför armeringsjärn
☐	9. Konstruktionens storlek efter rotation ska anpassas efter den specifika armeringsbur som tilldelats av Skanska (<i>se figur 34</i>)	< 200 mm ovanför armeringsjärn
☐	10. Konstruktionen ska klara av momentet som uppstår från armeringsjärnet	37,5Nm
Omgivningskrav och säkerhet		
☐	11. Tåla minimal temperatur	0°C
☐	12. Tåla maximal temperatur	50 °C
☐	13. Tåla fukt	<CRC2 (Festo, 2016)
☐	14. Kablar och slangar ska förhindras från trassel	Ja



Figur 33 - Krav för geometri i ursprungsläge



Figur 34 - Krav för geometri i roterat läge

3.2.5 Konceptgenerering

Under konceptgenereringen användes metoden brainstorming (se kap. 2.4.2 - Brainstorming) med hjälp av andra projektinvolverade människor, och lösningarna skissades på papper. Därefter användes Solid Works för att rita upp lösningarna vilket förenklade helhetsbilden av koncepten då de innehöll många delar som rörde sig. På detta sätt kunde författaren även avgöra proportioner, funktioner och eventuella tillägg.

Under konceptgenereringsfasen delades uppgiften in i två delproblem, grepp-och rotationsfunktion. Nedan presenteras några av de lösningar som arbetats fram oberoende om de var genomförbara eller klarade alla krav. Förklaring av lösningarna baseras på uppskattningar och de rörelsetester som gjorts av sammanställningarna i Solid Works.



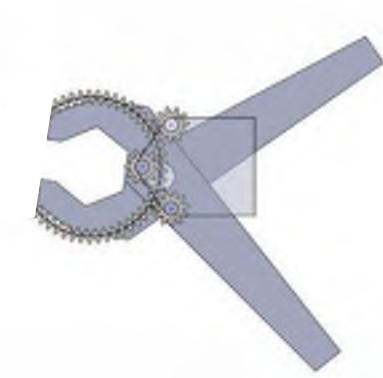
Figur 35 - Koncept 1

Koncept 1

Funktion: Grepp

I koncept 1 används en elektromagnet för att plocka armeringsjärn och en öppning formad som en tårtbit för att möjliggöra fixering av armeringsjärn.

Lösningen kräver ingen speciell åtkomst från fixturen då elektromagneten har möjlighet att hämta armeringsjärnet strax ovanför fixturen.



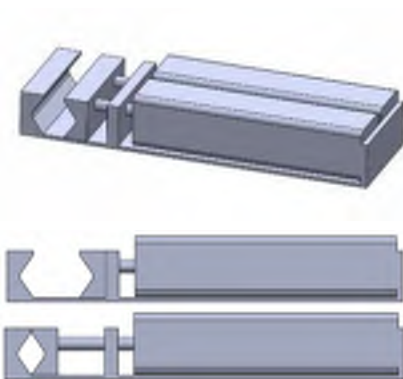
Figur 36 - Koncept 2

Koncept 2

Funktion: Grepp & rotation

Koncept 2 använder sig utav en hävarm och kugghjul. Tanken är att en linjär enhet ska pressa ihop "tången" och en servo som utför rotationen.

Då kugghjulen har en centrumpunkt i mitten av armeringsjärnet gör det att armeringen inte kommer förflyttas under rotation, därmed minska momentkraften som krävs för rotationen.



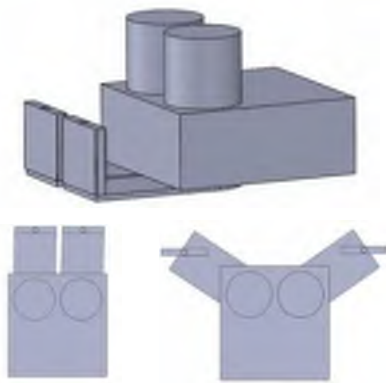
Figur 37 - Koncept 3

Koncept 3

Funktion: Grepp

I koncept 3 är tanken att man kan använda sig utav linjärenheter att utföra greppet. Detta gör att man kan anpassa geometrin bättre efter den fastställda kravspecifikationen.

Eftersom linjärenheten pressar armeringsjärnet mot en stationär del behöver den vara hälften så kraftfull som ett standardgripdon som har två gripfingrar som rör sig mot varandra.

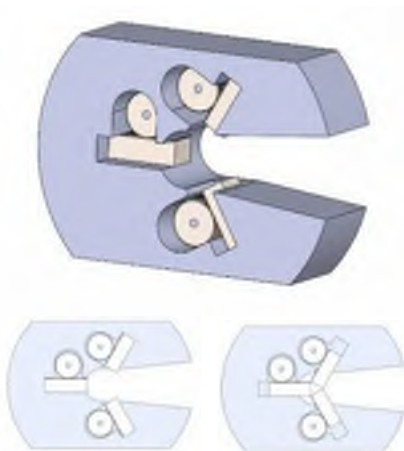


Figur 39 - Koncept 4

Koncept 4

Funktion: Grepp

Med hjälp av två servon roteras två fingrar mot armeringsjärnet och trycker den emot den stationära delen.

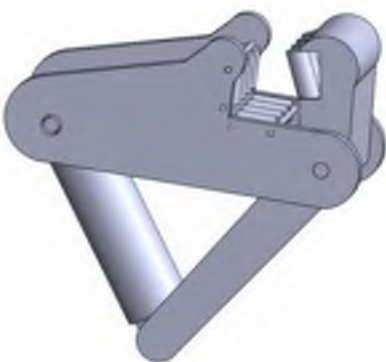


Figur 40 - Koncept 6

Koncept 5

Funktion: Grepp

Koncept 5 har en koncentrisk mekanism som med hjälp av roterande kugghjul pressar tre kuggstänger mot järnet. Armeringen kommer alltid ha samma centerpunkt i alla dimensioner.



Koncept 6

Funktion: Grepp

Koncept 6 använder en linjärenhet för att greppa om armeringsjärn. Eftersom den använder hävarmseffekten finns stora möjligheter för utväxlingar.



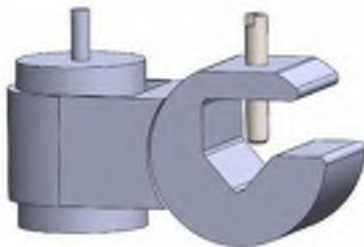
Figur 41 - Koncept 7

Koncept 7

Funktion: Grepp & rotation

Koncept 7 använder sig också av en koncentrisk rörelse. Den är uppbyggd med 3 skivor som har olika ändamål. De yttre har linjära spår som riktar "pinnarna" och den mittersta har spår som låter pinnarna röra sig mot mitten när den roteras.

Denna lösning gör även att armeringen alltid är centrerad. Eftersom konceptet är runt möjliggörs även rotering av hela verktyget om man roterar de yttre skivorna. Det finns stora möjligheter för utväxling eftersom cirkeln är stor och motorns kugg kan anpassas.

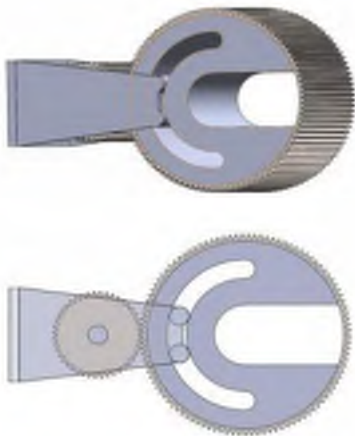


Figur 42 - Koncept 8

Koncept 8

Funktion: Grepp

I koncept 8 används en servo som med kuggar roterar en gängstång mot armeringen. Då gängstången kan ha en liten gänga bidrar detta till en hög utväxling. Gängstången behöver inte heller någon låsning eftersom gängstången behåller sin position när motorn stannat.



Figur 43 - Koncept 9

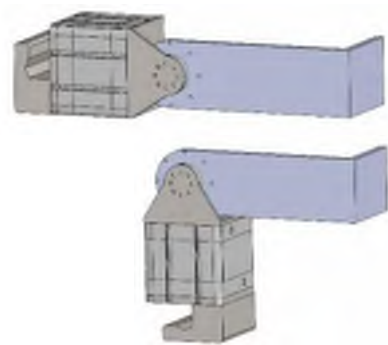
Koncept 9

Funktion: Rotation

Koncept 9 är uppbyggd i två delar, en stationär och en roterande del. I den stationära delen finns en servo (bakre kugghjulet) som styr rotationen av verktyget. Det finns även två stänger håller den roterande delen fastspänd.

Rotationen kommer att ske runt armeringsjärnets centeraxel, vilket minskar momentkraften som krävs i servon.

På grund av det stora antalet av kuggar på den roterande delen så finns väldigt stora möjligheter för utväxling.



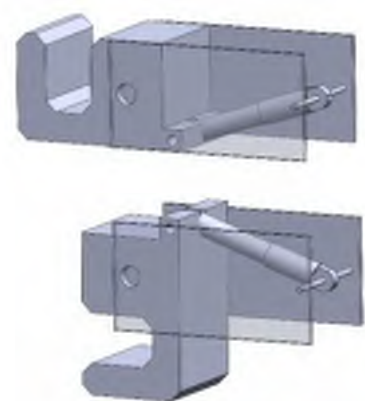
Figur 44 - Koncept 10

Koncept 10

Funktion: Grepp & Rotation

Koncept 10 har en rotationspunkt bakom gripfunktionen som med hjälp av en roterande enhet kommer att rotera verktyget.

Greppet mot armeringsjärnet uppnås genom att en linjärenhet som pressar kolven mot järnet. Armeringsjärnet ligger i en kloformad del som gör att järnet pressas mot en "vägg".



Figur 45 - Koncept 11

Koncept 11

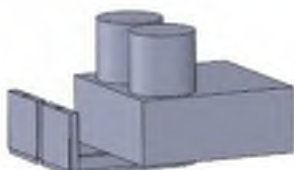
Funktion: Rotation

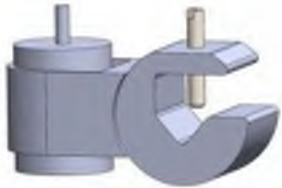
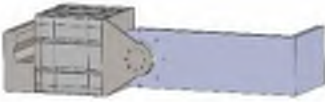
Koncept 11 roterar verktyget med en linjärenhet. Rotationspunkten ligger strax bakom armeringsjärnet vilket gör att den ökade momentkraften från armeringsjärnets egenvikt inte bli så hög. Höjden på verktyget blir även lägre i roterat läge än koncept 10 eftersom rotationspunkten ligger närmare gripmodulens centrum.

3.2.6 Konceptval

I konceptvalet utfördes en sammanställning på de koncept som framställts för att utvärdera samt framhäva lösningarnas för- och nackdelar. Genom att göra detta kunde ett beslut för vidare utvärdering och utveckling göras. I nedanstående *tabell 5* illustrerar konceptens för- och nackdelar för varje funktion.

Tabell 5 - Sammanställning av konceptgenerering

Nr.	Illustration	Fördelar	Nackdelar
1		+ Kompakt + Få krav på fixtur	- Opålitlig, blir inte precis samma grepp varje gång - Håller inte emot momentkraften från armeringsjärnet
2		<u>Grepp</u> + Stor utväxlingsförmåga <u>Rotation</u> + Stor utväxlingsförmåga + Rotationen runt centrum, kräver lågt vridmoment	<u>Grepp</u> - Storlek, höjd <u>Rotation</u> - Många komponenter - Komplexitet
3		+ Hög kraft	- Storlek, bredd
4		+ Stor utväxlingsförmåga	- Storlek, höjd - Storlek, bredd
5		+ Armeringsjärn alltid centrerat, mindre krav på vridmoment för rotation + Hög kraft + Stor utväxlingsförmåga	- Storlek, höjd - Storlek, bredd - Komplexitet
6		+ Stor utväxlingsförmåga + Hög kraft	- Storlek, höjd
7		+ Armeringsjärn alltid centrerat, mindre krav på vridmoment för rotation + Hög kraft + Stor utväxlingsförmåga	- Storlek, höjd - Komplexitet

8		+ Få komponenter + Hög kraft + Kräver ingen låsning eller aktiv servo + Stor utväxlingsförmåga	- Slitage på gängstång
9		+ Stor utväxlingsförmåga	- Komplexitet - Storlek, höjd
10		<u>Grepp</u> + Få komponenter + Kompakt <u>Rotation</u> + Få komponenter + Storlek, höjd, i ursprungsläge	<u>Grepp</u> - Armeringsjärnets centrum är inte på samma position i alla dimensioner <u>Rotation</u> - Kräver stort vridmoment - Kräver robotrörelse för att behålla armeringens centeraxel - Storlek, höjd, i roterat läge
11		+ Storlek, höjd, i ursprungsläge + Storlek, höjd i roterat läge + Få komponenter + Relativt låg kraft för rotering + Hög utväxlingsförmåga	- Kräver robotrörelse för att behålla armeringens centeraxel

Tabell 6 - Val för vidare utvärdering

Nr.	Grepp	Rotation	Kommentar
1	☐		För opåligtligt grepp
2	☒	☐	Rotation: väldigt lik nr. 9 som vidarearbetats
3	☐		Liknar nr.10 men med mindre passande geometri.
4	☒		
5	☐		För bred när servon monterats
6	☒		
7	☒		
8	☒		
9		☒	
10	☒	☒	
11		☒	

Vissa koncept ansågs likna andra, vilket medför samma värden i utvärderingen. Andra koncept ansågs falla utanför de kriterier som finns för uppgiften. De som valts för att vidare utvärdera i verktyget Pughs matris är koncept 2,4,6,7,8 och 10 i greppkategorin samt koncept 9,10 och 11 i roteringskategorin. I greppkategorin användes ett parallellgripdon från FESTO som referens och i rotationskategorin användes koncept 9 som referens.

		Grepp							
Vikt	Egenskap	Koncept							
		Referens	Koncept 2	Koncept 4	Koncept 6	Koncept 7	Koncept 8	Koncept 10	
5,0	Kraftöverföring	0	1	-1	1	0	1	1	
3,0	Slitage	0	-1	-1	0	-1	-1	0	
5,0	Flexibel gällande olika diametrar	0	0	0	0	0	0	0	
2,0	Krävt vridmoment för rotering	0	0	0	0	1	0	0	
4,0	Få specialtillverkade komponenter	0							
3,0	Processtid	0							
5,0	Komplexitet	0	-1	-1	-1	-1	1	1	
4,0	Vikt	0	1	1	1	1	1	1	
5,0	Pålitligt grepp	0	0	-1	1	1	1	0	
5,0	Storlek bredd	0	1	-1	1	1	1	1	
5,0	Storlek höjd	0	0	-1	-1	-1	1	1	
5,0	Storlek höjd, roterat läge	0	0	0	-1	-1	-1	1	
Antal +			3	1	4	4	6	7	
Antal -			3	7	4	5	3	0	
Viktad summa			2	-31	0	-6	18	32	

Figur 47 - Konceptutvärdering med Pughs matris på gripfunktionen

		Rotation		
Vikt	Egenskap	Koncept		
		Referens (Koncept 9)	Koncept 10	Koncept 11
5,0	Storlek höjd	0	1	1
5,0	Storlek höjd i roterat läge	0	-1	1
5,0	Storlek bredd	0	0	1
4,0	Vikt	0	0	1
2,0	Krävt vridmoment	0	-1	-1
3,0	Processtid	0	0	1
5,0	Komplexitet	0	1	1
4,0	Få specialtillverkade komponenter	0	1	1
Antal +			3	7
Antal -			2	1
Viktad summa			7	29

Figur 47 - Konceptutvärdering genom Pughs matris på rotationsfunktionen

De två lösningar som tydligt erhöill högst värden i Pughs matris var griplösningen i koncept 10 samt rotationslösningen koncept 11 (se figur 46 & 47). Efter diskussion med uppdragsgivaren ansågs rotationslösningarna koncept 9 och 11 potentiella för uppgiften trots ett lägre resultat i utvärderingsverktyget. För att vidare utvärdera lösningarnas funktionsduglighet utvecklades och analyserades dem när de var sammanfogade med gripkonceptet 10. Anledningen till detta är att funktionsdugligheten är baserad på de komponenter som krävs för lösningen.

Det slutliga konceptvalet genomfördes när komponenterna var fastställda i Fas 3 (kap 3.3).

3.3 Fas 3 – Design på systemnivå



Figur 48 - Position för fasen Design på systemnivå i produktutvecklingsfasen

I fas 3 beskrivs funktionernas användbarhet utifrån vilka komponenter som nyttjades. Eftersom två koncept valdes att utvecklas vidare kommer komponentval att göras på båda koncepten. Det slutliga konceptvalet fastställs efter funktionsdugligheten har analyserats.

3.3.1 Komponentval och funktioner

Koncept 10

Gripfunktionen använder en linjärenhet för att gripa armeringsjärnet. Monterad på linjärenheten finns en kloformad del med syfte att hålla armeringsjärnet på plats under tiden enheten applicerar en kraft på järnet. Eftersom Newtons 3e lag säger att en normalkraft kommer att skapas i motsatt håll från den riktning linjärenheten trycker ifrån, krävs endast halva kraften för att linjärenheten ska behålla armeringsjärnet horisontellt (se kap 4.1.1 – Beräkningar).

Eftersom stor fokus sätts på vikt och storlek är en pneumatisk cylinder (linjärenhet) optimalt. Pneumatiska cylindrar är kända för sitt kompakta utförande och sin låga vikt men har dessvärre en lägre precision än elektriska enheter (se kap 2.5.3). I uppgiften har inte precision någon större verkan om kraften på kolven är en given faktor.

Armeringsjärnet har en grov yta och använder sig utav kammar (se kap 3.2 – Armeringsjärn). Skulle man använda ett något mjukare material för att greppa med kan grovheten utnyttjas för att behålla armeringsjärnet horisontellt och gör att man inte är helt beroende av friktionskoefficienten som inte har en given faktor. Eftersom kraften är svår att beräkna och ett mjukt material har olika egenskaper som kan anses som svåra att förutspå krävs tester för att bekräfta kraften hos linjärenheten. Dock kunde tidigare beräkningar ligga som grund för vilka krafter det handlade om.

Koncept 9

Konceptet baseras på att ett spår och en kugg ska vara monterad på gripdelen och nyttja samma centrum som armeringsjärnets centrumaxel. Detta gör att armeringsjärnet kommer roteras endast med hjälp av verktyget och roboten behöver inte vara aktiv för att bibehålla järnets position. För att minska antalet specialtillverkade komponenter gjordes en sökning externt efter produkter som kunde användas.

Rotationskomponenter

HepcoMotion säljer produkter för bland annat cirkulära rörelser där olika slags system möjliggör diverse applikationer för robotsystem. En av deras produkter är PRT2 som är ett slags spår som låter en vagn löpa i spåret. PRT2 har olika tillval som gör mer avancerade tillämpningar genomförbara där kuggspår är intressant till denna uppgift.

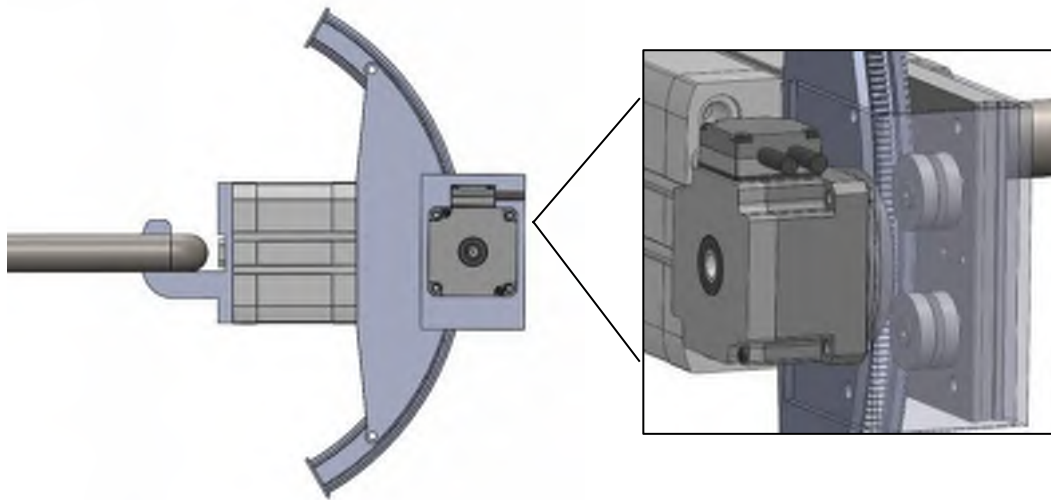


Figur 49 - Hepco Motions produkt PRT2

Genom att fästa spåret på den roterande delen och vagnen på den stationära kan verktyget rotera. Eftersom spåret fästs bakom gripmodulen så iaktas detta när komponenter väljs. För att vagnen ska få plats att rulla bakom gripmodulen valdes "TRES 376" med 446 kuggar.

Vridmomentet som krävdes var 37,5 Nm och genom att använda ett kugghjul med 22 kuggar kunde momentet minskas till 1,8 Nm.

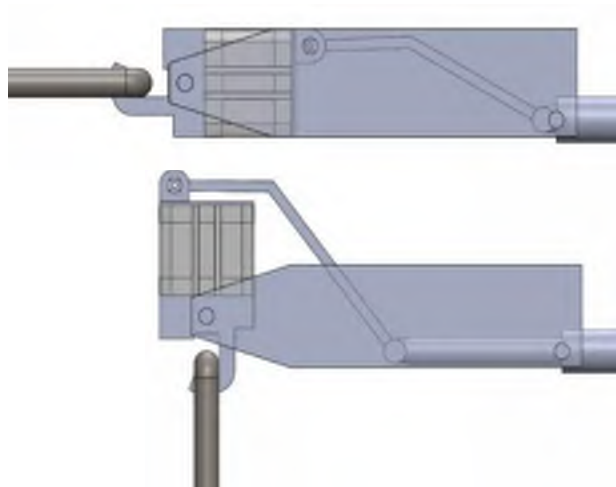
Harmonic drive är ett företag som utvecklar kompakta växelmotorer och var därför passande till denna lösning. Växelmotorn som valdes heter FHA-11C-Mini som med en utväxlingsratio 1:100 uppnår stoppmomentet 4,2 Nm (för att bibehålla verktyget på en given position).



Figur 50 - Koncept 9 med PRT2 monterat

Koncept 11

I koncept 11 nyttjas en pneumatisk cylinder som utför rotationen av gripmodulen. För att ta reda på kraften som krävdes för linjärenheten användes Solid Works verktyg, Motion Study. Genom att analysera hela rörelsen i programmet beräknades den största kraften ut, 450 N.



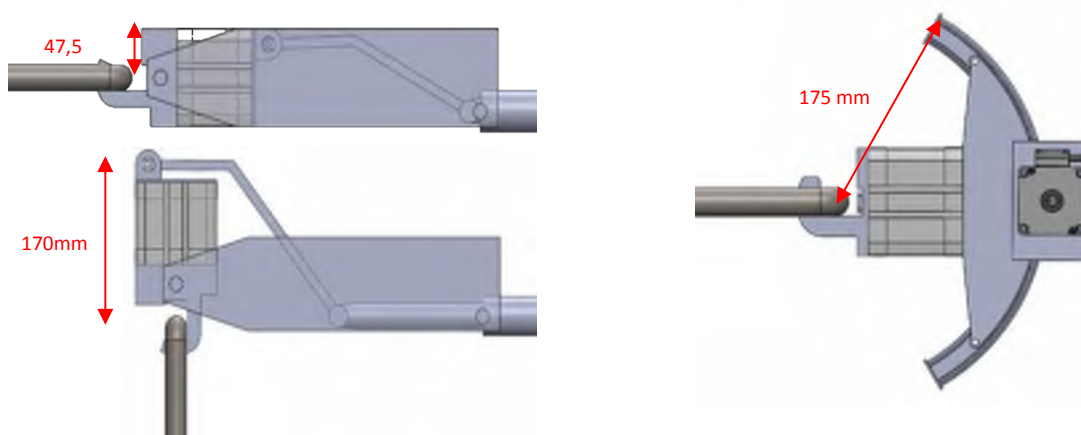
Figur 51 - Koncept 11 under systemutveckling

Rotationskomponenter

Festo är ett företag har ett stort utbud av pneumatiska applikationer. En av deras produkter heter "Compact cylinder ADN" som är en dubbelverkande pneumatisk cylinder (se kap. 2.5.3). En ADN-cylinder med kolstångsdiameter 50 mm valdes, som uppnår kraften 1057 N i både drag och tryck.

Sammanställning

Genom att närmare analysera varje koncept kunde funktionsdugligheten fastställas. En faktor som varit styrande i många moment har varit storleken av verktyget. För att analysera detta ställdes verktygets storlek mot kraven för verktygets geometri i både ursprungsläge och roterat läge (se tabell 7).



Figur 52 - Illustrering av dimensioner

Tabell 7 - Sammanställning av systemutveckling och val av koncept

Namn	Höjd i ursprungsläge	Bredd	Höjd i roterat läge	Godkänd/Icke godkänd
KRAV	120 mm	110 mm	200 mm	☒
KONCEPT 9	175 mm	95 mm	175 mm	☐
KONCEPT 11	47,5 mm	105 mm	170 mm	☒

I kravspecifikationen beskrivs kraven för storleken för verktyget. I ursprungsläge får verktyget vara 120 mm i höjd, 110 mm i bredd och i roterat läge är det ställda kravet 200mm.

Koncept 9 utgår ifrån en radie av spåret från Hepco Motion, vilket är 175 mm. Positionen på verktyget har ingen betydelse då radien alltid är 175 mm, vilket gör att det givna kravet på höjden i ursprungsläge inte är tillräcklig. Koncept 9 är alltså *inte* funktionsduglig.

Koncept 11 är däremot 47,5 mm högt och 105 mm brett i ursprungsläge samt 170 mm i roterat läge vilket gör att verktyget är funktionsduglig och kommer att fortsätta att vidareutvecklas.

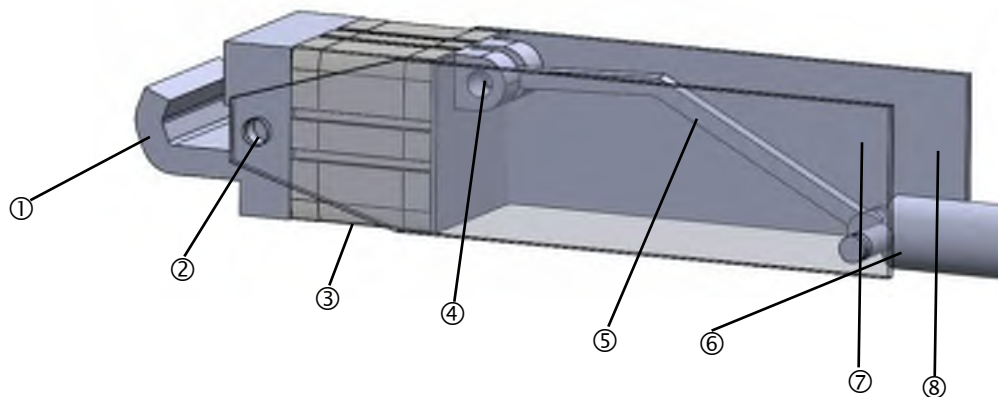
3.4 Fas 4 – Design på detaljnivå



Figur 53 - Position av fas 3 i produktutvecklingsprocessen

Fas 4 syftar på att utveckla och optimera komponenter i detalj samt utföra de slutliga måttsättningarna som slutkonceptet ska bestå av. Inledningsvis definieras komponenterna som ska undersökas och eventuella kommentarer angående förbättringar, måttsättningar och material. Datorstöd har använts med programmet Solid Works där bland annat verktyget Motion Study och massaegenskaper användes. Arbetet skedde iterativt för att ha möjlighet att anpassa komponenterna för varandra.

3.4.1 Komponentdefiniering & detaljutveckling



Figur 54 - Komponentdefiniering av Koncept 11

- ① Gripklo
- ② Rotationspunkt
- ③ Cylinder för gripfunktion
- ④ Fäste för rotationscylinder
- ⑤ Linjär-rotations rörelse
- ⑥ Cylinder för rotationsfunktion
- ⑦ Utrymme för slangar
- ⑧ Hölje

1. Gripklo

Gripklon är det som ska hålla armeringen på plats samt ta upp den kraft som den pneumatiska cylindern applicerar. För att behålla en låg vikt, men ändå klara de påfrestningar som utförs har Aluminium (6061-T6) valts.

Flexibelt material på greppunkterna

För att inte vara helt begränsad av friktionskoefficienten och ta nytta av armeringsjärnets grova yta (se kap. 4.3.1) användes ett mjukare material. Externa sökningar genomfördes med målet att finna slittåliga flexibla material. Ett material som ofta används i fabriksmiljö och har hög slitstyrka är termoplastisk polyuretan (PUR) och finns i flera hårdheter. För att bestämma vilken pneumatisk cylinder som behövdes gjordes ett test med polyuretan (med hårdheten A-shore 90) för att bekräfta kraften som behöll armeringsjärnet horisontellt (se figur 56). I testet sattes riktlinjer för att avgöra vad som ansågs godkänt (se tabell 9). Pneumatiska cylindrar i ADN-serien användes i testet.

- Armeringsjärnet bibehålls i horisontellt läge i 1 min.
- Armeringsjärnet "slirar" inte i polyuretanet med en extra last 3 Nm
- Polyuretanet får inte förflytta sig när greppet har verkställts

Tabell 8 - Testdata

Kolvdiameter	Applicerad kraft	Godkänd/Icke godkänd
50 mm	1057 N	☐
63 mm	1750 N	☐
80 mm	2827 N	☒

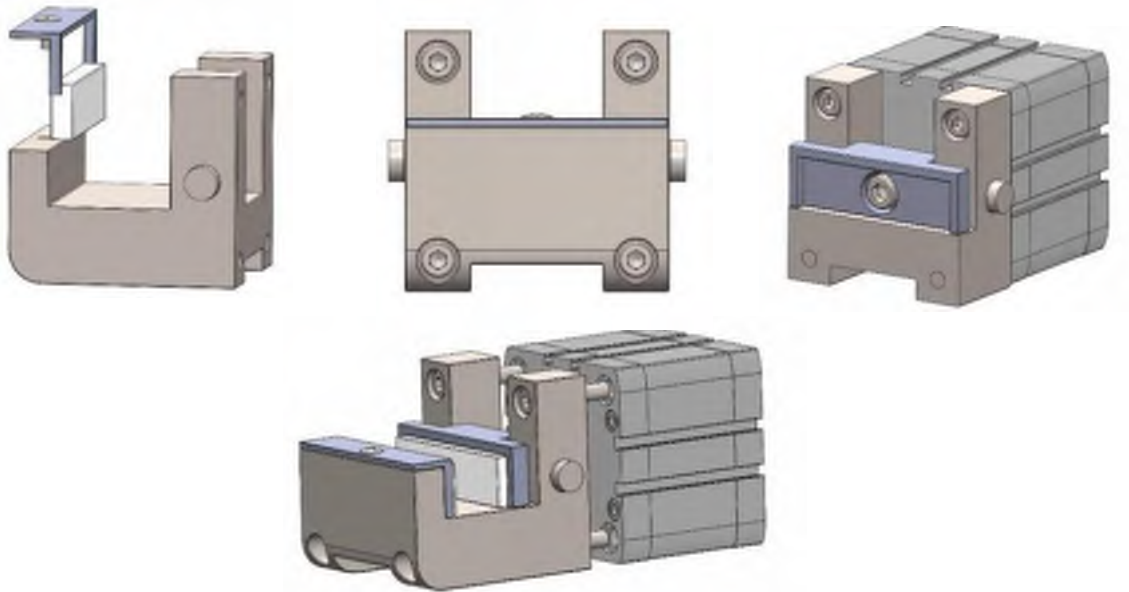


Figur 55 - Godkända testet av gripkraft

Testet resulterade i att med en pneumatisk cylinder med den applicerade kraften 2827 N samt användningen av polyuretan A-shore 90 bibehöll armeringsjärnet horisontellt och godkände den applicerade kraften. Polyuretan-bitarna deformerades 2-3mm på varje sida under påfrestning.

Griplons utformning

Eftersom polyuretan-bitarna ska kunna bytas krävs det utveckling av komponenten. Även skruvhål för montering på cylinder fastställas.



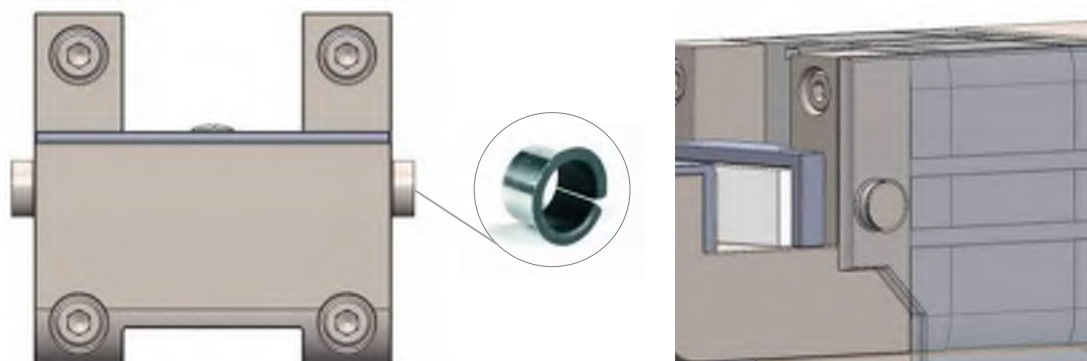
Figur 56 - Griplons komponenter

Genom att dela upp fästet för polyuretanet och griplon i separata delar förenklas tillverkningen av griplon samt proceduren för montering och demontering av polyuretan-biten. PUR-fästet på cylindern monteras med en skruv i kolven och PUR-biten monteras genom att trycka fast den.

Cylindern har fyra gängade hål som kan utnyttjas för montering av griplon. I griplon finns därför försänkta hål för m8-skrivar.

2. Rotationspunkt

För att rotationen ska vara möjlig och inte bidra med hög slitage krävs några förändringar.



Figur 57 - Positionering av glidlager

Gripklon har två solida stänger på varsin sida som ska rotera i de stationära höljesidorna. För att de ska kunna glida felfritt samt minska slitage används två bussningar med fläns i materialet Polytetrafluoreten (PTFE). PTFE är känt för sin låga friktion och är helt underhållsfritt. Materialet har även en god korrosionsbeständighet. Mer information om glidbussning kan ses i *bilaga 8*.

3. Pneumatisk cylinder för gripmodul

Med det tidigare testet med PUR-materialet kunde den begärda kraften fastställas. Eftersom en cylinder ifrån ADN-serien ska användas (som även genomförde testet) kunde dimension fastställas. I testet bekräftades kraften hos en ADN-cylinder med 80mm kolvstång. Slaglängden beror på hur mycket som gripmodulen ska ha möjlighet att öppna och stänga. Armeringsjärn med dimensioner 12-25 mm ska hanteras samt ha en marginal för att hitta en aning missformat armeringsjärn ($\pm 5\text{mm}$, hämtat från kravspecifikationen) och dessutom ha möjlighet att göra rörelser med armeringsjärn i gripklon oförhindrat när inte gripmekanismen är aktiv. I nedanstående *tabell 10* illustreras de faktorer som antagits när slaglängd har bestämts.

Tabell 9 - Beräkning av slaglängd

Förklaring	Längd
Armeringsjärn (12-25mm)	+13mm
Eventuella missformningar	+5mm
Deformation, PUR-bitar (3mm)	+6mm
Rörelsefrihet när greppet är inaktivt	+6mm
Summa	30 mm

De komponenter som valdes var pneumatiska cylindern *ADN-80-30-I-P-A-R3* (se mer i databladet *bilaga 9*), 6mm slang samt slangkopplingarna *NPQH-L-G18-Q6-P10*.

Tabell 10 - Produktinformation, ADN-80-30-I-P-A-R3

Relevant produktinformation <i>ADN-80-30-I-P-A-R3</i>	
Dubbelverkande	☒
Korrosionsbeständig	☒
Inre gänga på kolv	☒
Teoretisk kraft vid 6 bar	2827N
Slaglängd	30mm
Vikt	1375g



Figur 58 - Gripcylinder samt slangkopplare

4. Fäste för rotationscylinderns kolv

För att minska antalet specialtillverkade produkter och för att säkerställa komponentens konstruktion användes tillbehör från FESTO som är anpassat till deras produkter. För att rotationen ska kunna utföras måste ett fäste finnas monterad på gripmodulen som är kopplat till rotationscylindern. I detta syfte används produkten SG-M12X1,25 som är en gaffel som monteras på kolven (se figur 60). För att kunna koppla fast gaffeln på gripmodulen konstruerades en komponent med två skruvar vilket gjorde att rotationsrörelsen inte behövde vara helt begränsad efter gripmodulens konstruktion.



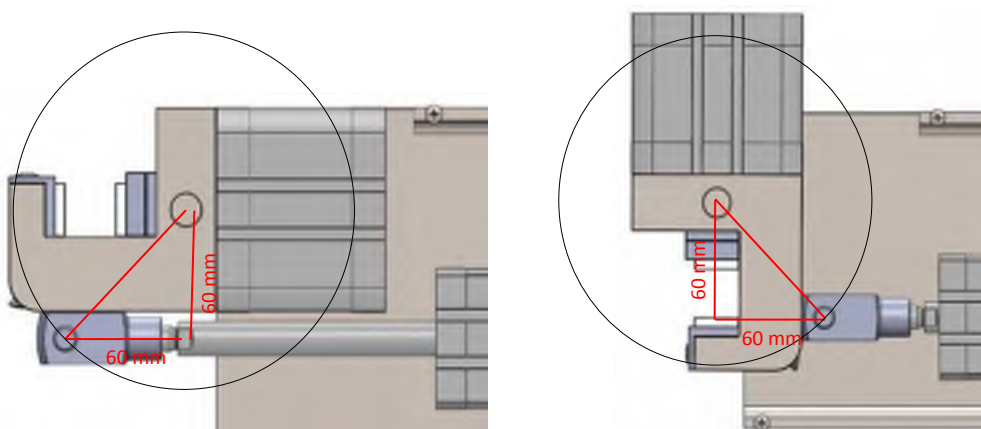
Figur 59 - Fäste för rotationscylinderns kolv

5. Linjär-rotations rörelse

På grund av den långa länken som sammansatte gripmodulen och roterande cylindern blev dels verktyget väldigt långt och länken blev högt belastad. Detta gjorde att rörelsen för rotationen fick vidareutvecklas.

Genom att utnyttja längden på gripmodulen kunde fästet för gaffeln placeras under den istället för bakom. Detta gjorde att cylindern bidrar till minimalt med utrymme i utdraget läge (se figur 61).

För att cylindern skulle behålla ett horisontellt läge när verktyget är i ursprungsposition samt i den roterade positionen behövdes rörelsen vidare studeras. I figur 61 illustreras avsikten för rotationen där slaglängden samt fästets position kan räknas ut genom den rätvinkliga triangeln. Slaglängden behöver vara 120 mm på den roterande cylindern för att behållas i horisontell position i båda lägen.



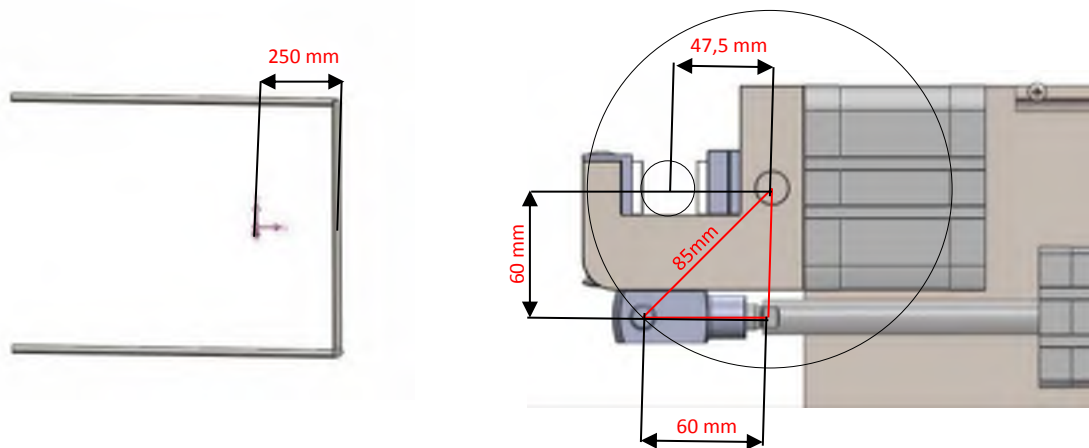
Figur 60 - Rotationsrörelse

6. Pneumatisk cylinder till rotation

För att kunna välja pneumatisk cylinder för rotationsfunktionen så krävdes beräkningar som bekräftade den maximala kraften som begärdes.

Ett extremfall är när det längsta och grövsta C-armeringsjärnet ska hanteras. Järnet är 25 mm i diameter samt 6 meter långt med 1 meter långa kortsidor och vikten från den längsta sidan delas upp på tre robotar. En förenkling kan genomföras genom att beräkna ett C-järn med längden 2 meter (6 meter/3 robotar) och kortsidorna 1 meter. Sedan tidigare beräkningar (kap 4.1.1 – Beräkningar) har massan fastställts, 3,85 kg/m.

Med hjälp av Solid Works har armeringsjärnets tyngdpunkt beräknats och är 250 mm från långsidans centeraxel.



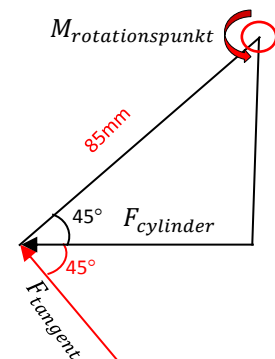
Figur 61 - Armeringsjärnets tyngdpunkt & dimensioner för beräkning

Momentkraften i rotationspunkten är $\Rightarrow$

$$M_{\text{rotationspunkt}} = (4 \times 3,85 \times 9,82) \times 0,0475 + 0,250 = 45 \text{ Nm}$$

$$F_{\text{tangent}} = \frac{M_{\text{rotationspunkt}}}{0,085} = \frac{45}{0,085} = 529,4 \text{ N}$$

$$F_{\text{cylinder}} = \frac{F_{\text{tangent}}}{\cos(45)} = \frac{529,4}{\cos(45)} = 748,7 \text{ N}$$



Figur 62 - Illustration av applicerade krafter

Enligt beräkningarna ska rotationscilindern ha en kraft på minst 748,7 N. Eftersom rotation kan ske mot båda riktningar måste även cylindern vara dubbelverkande. Den pneumatiska cylindern som valdes heter *ADN-50-120-A-P-A-R3* (se *bilaga 10* för datablad).

Med en cylinder som använder tryckluft är hastigheten svår att hantera när inte luftflödet regleras. Har rotationen för hög acceleration finns risken att greppet förlorar effekt. I syftet att strypa luftflödet används slangkopplingar med ett justerbart munstycke vilket resulterar i att rätt luftflöde kan arrangeras manuellt.

Att montera rotationscilindern genomförs med två tillbehör till cylindern från FESTO genom att montera svivelflänsen på cylindern och tillhörande del på bakre delen av höljet (se *figur 65*).



Figur 63 - Tillbehör till roterande pneumatiska cylindern (Festo, 2016)

Tabell 11 - Produktinformation, ADN-50-120-I-P-A-R3

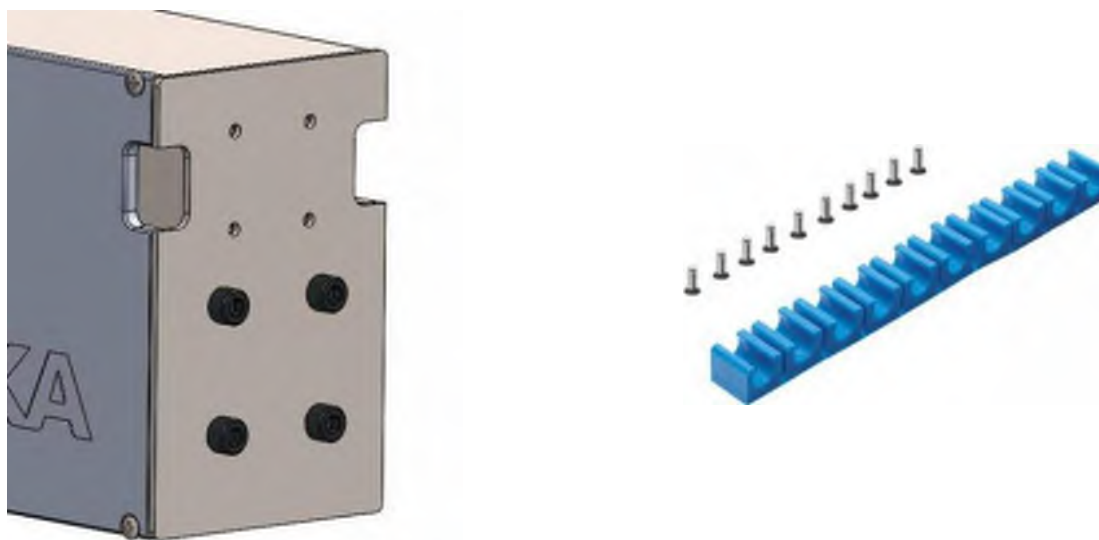
Relevant produktinformation <i>ADN-50-120-A-P-A-R3</i>	
Dubbelverkande	✓
Korrosionsbeständig	✓
Yttre gänga på kolv	✓
Teoretisk kraft vid 6 bar	1057N
Slaglängd	120mm
Vikt	732g



Figur 64 - Positionering av roteringscilindern

7. Slangar

Ett av kraven i kravspecifikationen är att slangar ska förhindras att trassla. Av den anledningen har slangar inneslutits av höljet och har två öppningar till verktygskopplingen på baksidan av verktyget (se figur 66). Eftersom gripmodulen ska roteras är det viktigt att slangar inte läggs i kläm under rotation och därför har slangtillbehör från FESTO utnyttjats. Slanghållare monteras på insidan av höljet för att behålla slangarna på sin position (se figur 66) samt ett flexibelt band används för att ständigt dra slangarna mot höljet. Detta gör att när rotation sker låter banden slangen röra sig utan att vara i risk för kläm.

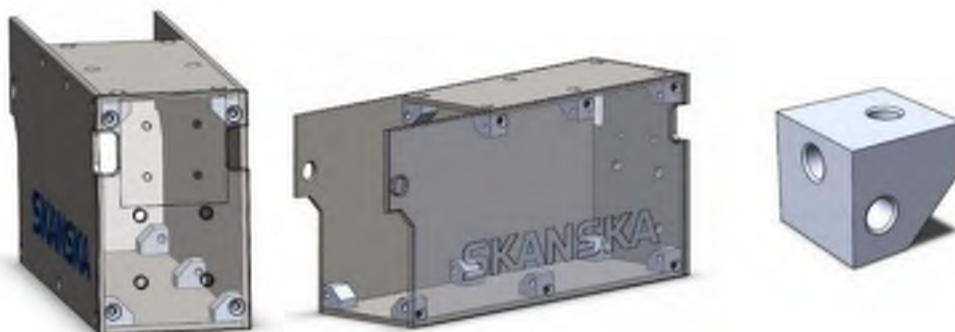


Figur 65 - Hål för slangar i höljet & Slanghållare (Festo, 2016)

8. Hölje

Höljet kommer att ha en bärande effekt för konstruktionen. För att minimera vikten har 6 mm Aluminium (6061-T6) valts. Vid varje hål av höljet finns ett "vinkeljärn" med som har gängade skruvhål som har formen som en avfasad kub. Kuben har i syfte att hålla ihop höljet samt förlänga hålets avstånd från höljets kant, vilket höjer hållfastheten. Kuben har tre hål som möjliggör montering för sidorna samt bakplatta med samma utformning.

På den bakre plattan finns även skruvhål för montering av verktygskopplaren RSP0109.



Figur 66 - Höljets delar

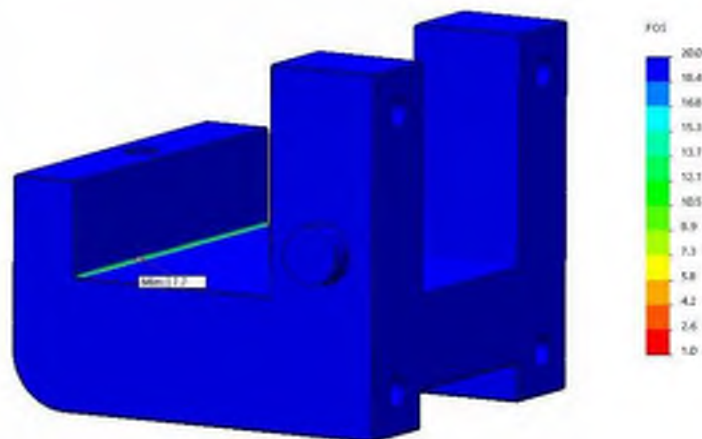
3.4.2 Simuleringar

För att säkerställa att konstruktionen klarar de påfrestningar som påverkas analyserades hållbarheten med hjälp av FEM-analyser i programmet Solid Works. Olika undersökningar utfördes på framtagna komponenter med syfte att säkerställa att olika uppskattade problem inte skedde. De komponenter som undersöktes var gripklon, fästet för kolvgaffel, höljet och bakre höljet. För att säkerställa att inte höljet töjer sig tillräckligt mycket för att rotationsstavarna falla ur höljets hål gjordes även en analys för höljets förflyttning i ett extremfall (se kap 3.4.2 – Rotationspunkt). I figurerna illustreras den position som komponenten först havererar samt FOS (factor of safety), dvs. en säkerhetsfaktor mot en detaljs plastiska deformation. I *bilaga 11* redovisas kompletta simuleringar med det fastställda rutnätet.

Gripenhet

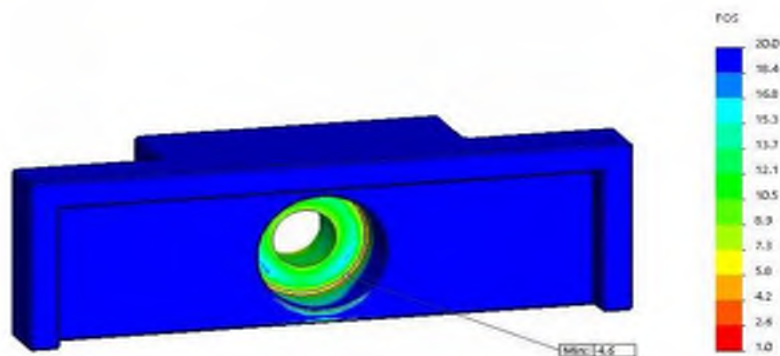
Gripklon är den komponent som ska hantera högst krafter och behöver därför vara hållbarast. Genom att applicera en kraft som motsvarar den pneumatiska cylinderns maximala kraftkapacitet kunde konstruktionen säkerställas. Även polyuretanfästet behövde analyseras för att säkerställa konstruktionen.

Gripklon



Figur 67 - FEM-analys av gripklon

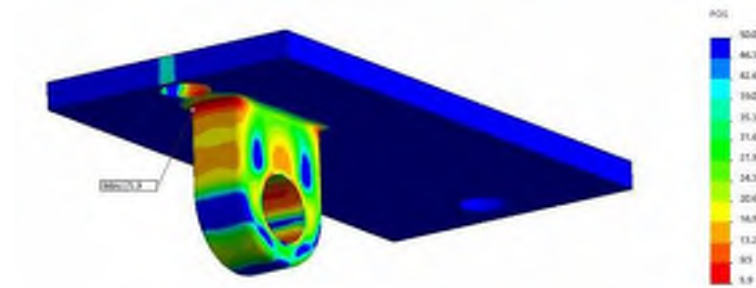
Polyuretanfäste



Figur 68 - FEM-analys av polyuretanfäste

Fäste för kolvgaffel

När rotationen är aktiv drar rotationscylindern i fästet för kolvgaffel, som i sin tur roterar gripenheten. Genom att analysera komponenten med den kraft som cylindern applicerar kunde konstruktionen undersökas.

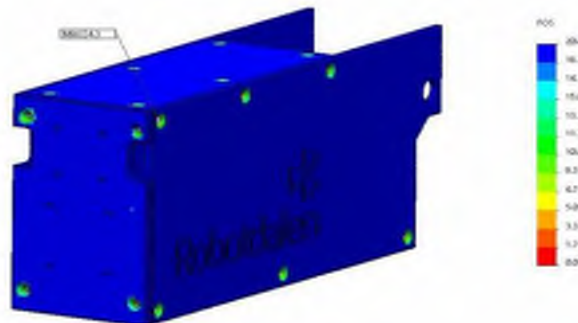


Figur 69 - FEM-analys för fäste av kolv

Hölje

Höljet är den bärande faktorn i verktyget och har syftet att hålla alla komponenter på den givna positionen. Eftersom robotens fästansordning är placerad bak på verktyget och gripenheten längst fram så ställs höga krav på höljets utformning och materialval. Genom att undersöka att höljets konstruktion klarar krafterna som påverkas gjordes tester i flera led då verktyget ska ha möjlighet att rotera.

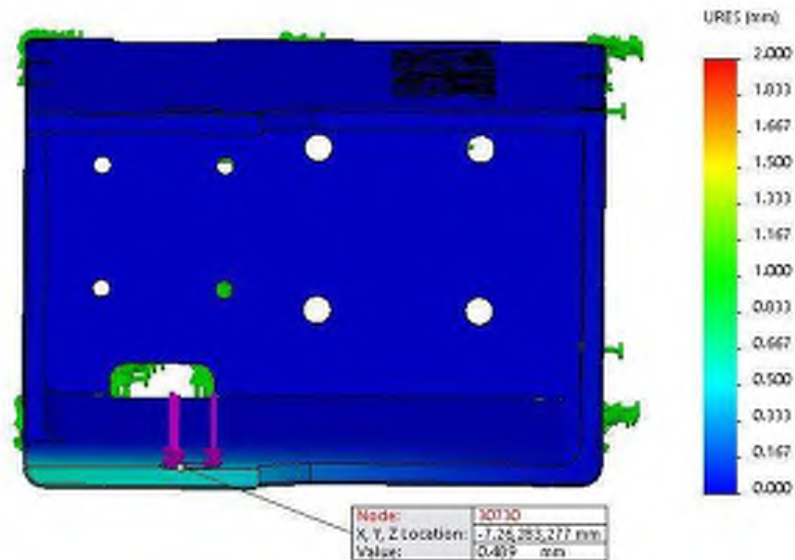
Eftersom den roterande cylindern ska ha möjlighet att applicera en kraft i båda riktningar utan att komponenten havererar gjordes även en analys för detta ändamål.



Figur 70 - FEM-analys på hölje

Förflyttning vid rotationspunkt

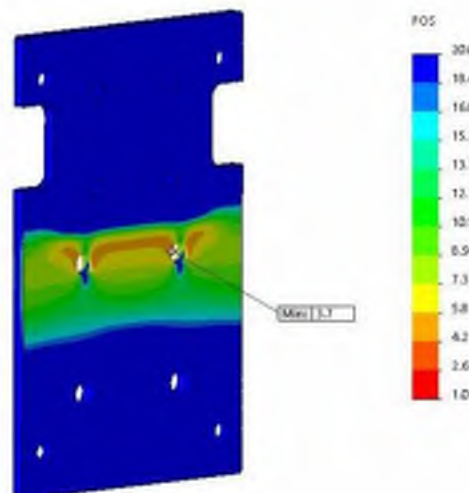
De massiva stavarna på gripklon ska kunna roteras i höljets anpassade hål. Eftersom det inte finns någon slags spärr som säkerställer att gripklon inte faller ur hålet när höljet deformeras måste en undersökning utföras för att säkerställa att inte höljet deformeras mer än 5 mm. Genom att rotera verktyget 90 grader och applicera hela armeringsjärnets vikt på ett av hålen på sidhöljet kunde ett extremfall undersökas.



Figur 71 - FEM-analys för förflyttning vid rotationspunkt

Bakre hölje

Den pneumatiska cylindern applicerar en kraft för att möjliggöra en rotering samt att bibehålla en specifik position. Genom att använda den maximala kraft som cylindern för rotationsfunktionen kan applicera kan detaljen analyseras.



Figur 72 – FEM-analys för bakre hölje

Sammanställning av simulering

Följande *tabell 13* illustrerar resultaten av simuleringen och påvisar att konstruktionen klarar av de påfrestningar som skapas. Eftersom att ingen given säkerhetsfaktor utges i de specificerade kraven utgår resultatet endast efter om konstruktionen uppnår plastisk deformation eller inte.

Tabell 12 - Sammanställning av simulering

<i>Komponent</i>	<i>Krav</i>	<i>Resultat</i>	<i>Godkänd/Icke Godkänd</i>
<i>Gripklo</i>	FOS: 1	FOS: 7,7	☒
<i>Polyuretanfäste</i>	FOS: 1	FOS: 4,6	☒
<i>Fäste för kolvgaffel</i>	FOS: 1	FOS: 5,9	☒
<i>Hölje</i>	FOS: 1	FOS: 4,3	☒
<i>Bakre hölje</i>	FOS: 1	FOS: 3,7	☒
<i>Förflyttning vid rotationspunkt</i>	5 mm	0,489 mm	☒

Simuleringen resulterade i ett argument för att alla komponenter klarar påfrestningarna som skapas i verktyget. Den komponent som erhöll lägst värde var polyuretanfästet med 4,4 i säkerhetsfaktor, vilket påvisar att komponenten skulle hantera krafter över 12 000 N.

4 RESULTAT

I följande kapitel illustreras och förklaras slutkonceptets funktioner samt översiktliga dimensioner. Resultatet av uppdraget presenteras med 3d-renderingar från Solid Works för att visualisera konceptets slutliga utförande.

4.1 Slutkoncept

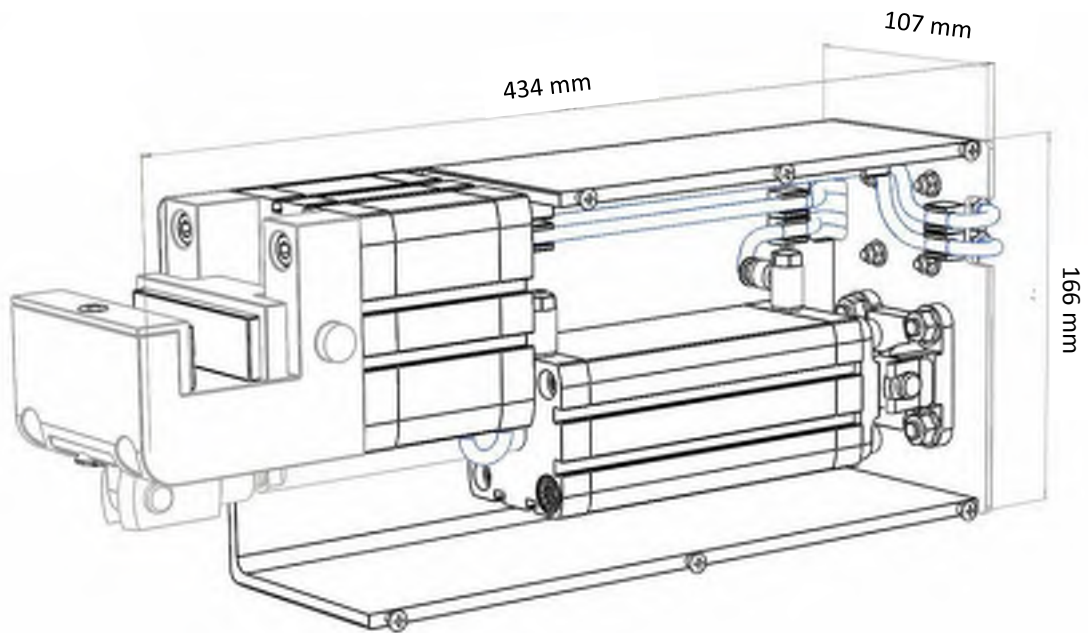
Resultatet av uppdraget består av dels framtagna komponenter och standardkomponenter. De standardkomponenter som slutkonceptet innehåller är två pneumatiska cylindrar, polyuretanstänger, verktygskopplare, slangar, slangkopplingar, kolvfästen och cylinderbeslag. De framtagna komponenterna till verktyget är hölje, gripklo, fäste till kolvgaffel och polyuretan-hållare.



Figur 73 - Illustration av slutkoncept

Resultatet av slutkonceptet möjliggör de moment som uppdraget kräver. Huvudmomenten är att gripa armeringsjärn med diameter från 12 till 25 mm och bibehålla det horisontellt ovanför marken samt att hantera en rotering för att låsa i en position 90° från ursprungspositionen.

Slutkonceptet är uppdelat i två enheter, grip- och rotationsenheten. Gripenheten har i syfte att gripa ett C-bökat armeringsjärn tillräckligt hårt för att bibehålla det horisontellt. Rotationssystemet gör att hela gripenheten roteras runt en rotationspunkt nära armeringsjärnets centrum.



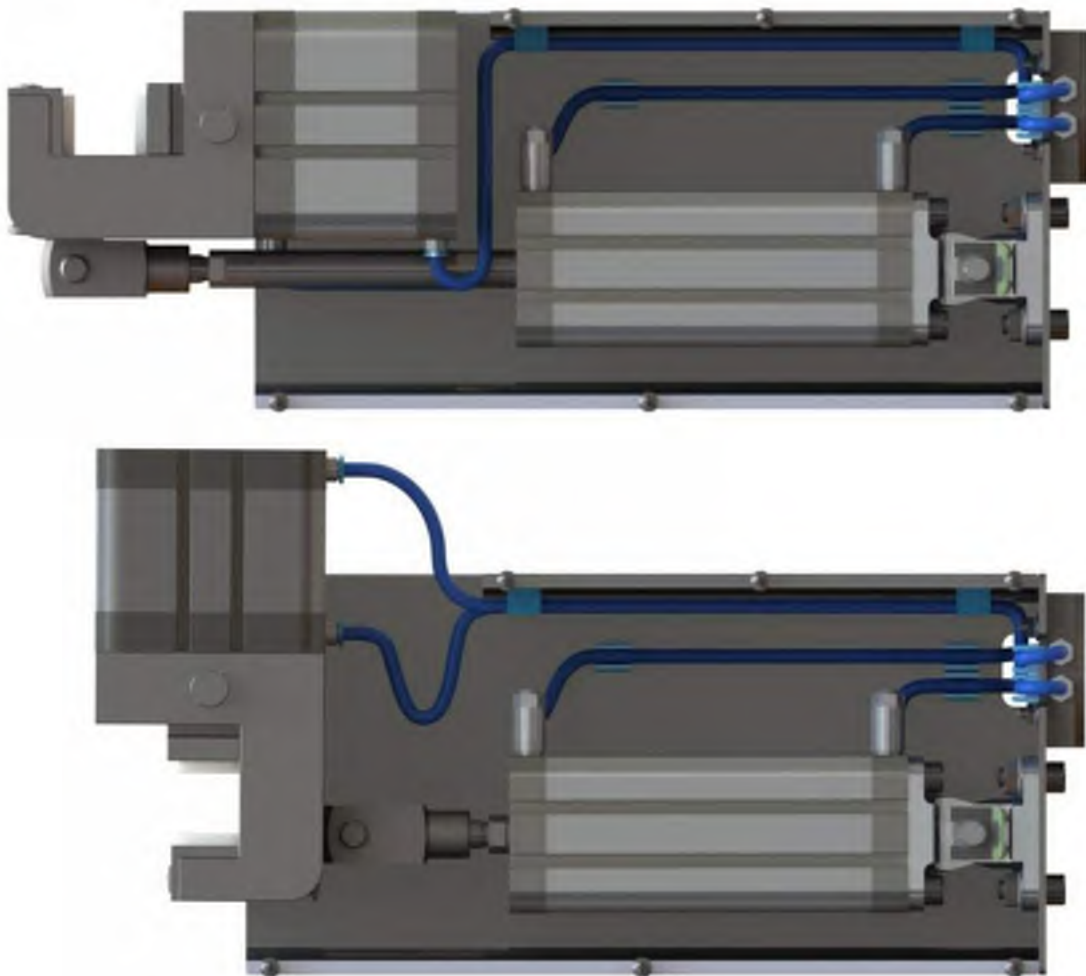
Figur 74 - Slutkonceptets dimensioner

Genom att utnyttja armeringsjärnets grova yta används ett flexibelt material, polyuretan, som tar grepp i armeringsjärnets "gropar" för att bibehålla järnet i horisontellt läge. Polyuretan-delen applicerar en kraft mot armeringsjärnet via en pneumatisk cylinder.

För att utföra en roterande rörelse används en dubbelverkande pneumatisk cylinder som drar och trycker gripmodulen i den riktning som önskas. Rotationen sker runt två massiva stavar på griplon som med hjälp av bussningar glider i höljets anpassade hål. Slangkopplingar med justerbart luftflöde möjliggör en långsammare rörelse på rotationen för att minimera risken för att gripenheten ska förlora sitt fäste.



Figur 75 - Gripenhet



Figur 76 - Redovisning av slutkonceptets rotation och inre komponenter

Komponenterna är inneslutna av ett hölje som skyddar alla enheter i ursprungsläget. Höljet har även ett syfte att minska risken för slangbrott eller trassel. På insidan av höljet finns slanghållare som även har i syfte att behålla slangar i rätt position och minska risken för slangslitage. Alla delar i verktyget är hopmonterat med skruvar för att möjliggöra simpel serviceåtkomst.

Gripdonet erhåller mindre än halva storleken samt tre gånger så låg vikt av ett standardgripdon med samma kraftöverföring. Rotationsenheten medför att gripdonets höjd inte lägre är kritisk under ursprungsläge och endast påverkar verktygets längd, vilket inte har någon begränsning.

4.2 Processen

Proceduren för att gripa, rotera och förflytta armeringsjärn är inte densamma på alla armeringsjärn. För att verktyget ska ha tillräckligt med utrymme för att utföra sitt arbete så anpassas körningen efter hur den givna positionen förhåller sig till verktyget. Verktyget kommer plocka armeringsjärnet på olika sätt beroende på vilken riktning armeringsjärnet ska rotera på grund av att verktygets roteringsvidd är 90 grader. Genom att roboten roterar axel 6 kan verktygets startposition anpassas efter den rotering som ska utföras.

Generellt sätt kan processen för förflyttning av ett C-järn (exempelvis steg 8 i kap 4.1.1) se ut på följande sätt.

1. Roterar axel 6 på robot för att ge rätt startposition för verktyget.
2. Förflytta verktyget till fixturen så att armeringen placeras i griplon.
3. Förse gripcylindern med luft för att applicera kraften mot armeringsjärn.
4. Robot lyfter verktyg och armeringsjärn och förflyttar dem ovanför given position.
5. Förse rotationscylindern med luft för att rotera armeringsjärn.
6. Roboten sänker verktyg och armeringsjärn till given position.
7. Robot 2 byter till najnings- eller svetsverktyg och sammanfogar armeringsjärn

4.3 Material och vikt

Verktygets vikt och storlek har varit en inriktande faktor under projektet där många kraftfulla komponenter ska erhålla relativt låg vikt. Materialet som använts på de framtagna komponenterna är aluminium AL-6160-T6 som har egenskapen att generellt ha låg densitet jämfört för den höga sträckgränsen. Materialinformation i *tabell 14*.

Tabell 13 - Materialinformation, Al-6160-R6

<i>Egenskaper</i>	<i>Värde</i>
<i>Al-6160-T6</i>	
<i>E-modul</i>	69 kN/mm ²
<i>Brottgräns</i>	310 N/mm ²
<i>Sträckgräns</i>	275 N/mm ²
<i>Densitet</i>	2700 kg/m ³

Vikten för de framtagna komponenterna beräknades med ett verktyg i Solid Works och vikten för standardkomponenter är baserade på produktens datablad. Komponenternas individuella vikt samt totala vikt illustreras i *tabell 15*. Tillbehör till cylindrar är komponenter som är anslutna till de pneumatiska cylindrarna såsom slangar, slangkopplingar, slanghållare, svivelfläns, kolvgaffel, m.m.

Tabell 14 - Vikttabell

<i>Komponent</i>	<i>Vikt (g)</i>
<i>Hölje</i>	2800
<i>Gripklo</i>	1067
<i>Fäste för kolvgaffel</i>	28
<i>Polyuretan-fästen</i>	43
<i>Polyuretan-stänger</i>	50
<i>Gripcylinder</i>	1375
<i>Roteringscylinder</i>	732
<i>Tillbehör till cylindrar</i>	300
<i>RSP0109</i>	700
<i>Totalvikt för verktyg</i>	7095
<i>1/3 armeringsjärn</i>	15400
<i>Totalvikt för järn och verktyg</i>	22495

5 Analys

I kapitel 5 analyseras resultatet och de tidigare frågeställningarna besvaras samt en undersökning ifall de specificerade kraven är uppfyllda.

5.1 Frågeställning

Den frågeställning som ligger till grund för arbetet och skulle besvaras definierades på följande sätt: *Är det möjligt att genom en automatiserad process, hantera och rotera cylindriska föremål med ett givet vridmoment i ett begränsat utrymme?*

Utifrån de teoretiska studier och analyser som genomförts samt den konstruktion som framtagits besvaras frågan: *Ja, det är möjligt att genom en automatiserad process, hantera och rotera cylindriska föremål med ett givet vridmoment i ett begränsat utrymme.*

Resultatet baseras på beräkningar som genomförs samt rörelseanalyser och FEM-analyser som undersökts i Solid Works (kap. 3.4.2). Genom de simuleringar som gjorts kan konstruktionen fastställas och bekräftar att slutkonceptet klarar av de påfrestningar som skapas genom hanteringen av cylindriska föremål med grov yta.

De mål som sattes tidigt i projektet var att kunna utföra verktygets moment under 10 sekunder samt ha en precision på ± 5 mm. Eftersom slutkonceptet har pneumatiska cylindrar som utför båda momenten i verktyget erhåller den en hög hastighet. Dessutom krävdes en flödesjusterare vilket minskar rotationshastigheten till en önskad hastighet. Hastigheten anses därför att vara uppnådd.

Om man bortser för oförutsägbara glapp i verktyget kan endast polyuretanet påverka "förskjutningar" av armeringsjärnet beroende på hur pass skadat eller missbildat armeringsjärnet är, dock anses detta falla innanför ramarna för precisionsgränserna eftersom materialet endast deformeras ett mindre antal millimeter.

För att ha möjlighet att svara på frågeställningen utreddes ett problem med hjälp av interna sökningar och diskussioner med uppdragsgivarna där två huvudsakliga delmoment framställdes. De två moment som skulle behandlas var att **bibehålla ett fast grepp under lyft, rotation och förflyttning av armeringsjärn i olika utföranden och rotation av armeringsjärn till 90° från ursprungsläge.**

Bibehålla fast grepp under lyft, rotation och förflyttning av armeringsjärn i olika utföranden

Den största utmaningen som i stort sett var den avgörande faktorn i projektet var att bibehålla ett fast grepp under lyft, rotation och förflyttning av armeringsjärn i olika utföranden. Genom att undersöka extremfall och behandla problemet hos detta fall kunde alla andra utföranden av armeringsjärn även genomföras med samma lösning.

Gripenheten består utav en pneumatisk cylinder som med tryckluft applicerar en kraft mot armeringsjärnet. Då trycket i cylindern inte minskar förrän luften släpps ut kommer kraften vara aktiv under hela förloppet. Detta gör att endast frågan om vilken kraft som krävs för att utföra momenten behövs besvaras då greppet hela tiden har möjlighet att vara aktivt.

Genom att utföra ett praktiskt test för att fastställa gripkraften (kap. 3.4.1 - Gripklo) med polyuretan-stänger kunde en pneumatisk cylinder med samma eller högre verkningskraft väljas för att bekräfta funktionsdugligheten.

Rotation av armeringsjärn till 90° från ursprungsläge

Den mest lämpliga lösningen valdes där det geometriska förhållandena var en avgörande faktor. I de specificerade kraven var storleken av verktyget beskrivet där bredden och höjden givna. Från ett större antal lösningar från brainstormingen till en mer begränsad mängd i konceptutvärderingen kunde efter diskussioner med uppdragsgivaren två koncept vidareutvecklas. Då båda hade tydliga för- och nackdelar gjordes beslutet att vidare studera koncepten för att verifiera funktionsdugligheten i fas 3. Efter undersökning konstaterades att koncept 9 inte föll innanför uppgiftens ramar och ett val för slutkoncept kunde avgöras.

En linjär-rotations rörelse utnyttjas för att möjliggöra rotationsrörelsen. Anledningen är att en linjärenhet har en liten storlek när det gäller höjd och bredd, men har nackdelen att vara långa. I de specificerade kraven fanns inga begränsningar för längden av verktyget, vilket gjorde att en linjärenhet var optimal för uppgiften.

Sammanställningen av grip- och rotations-enheten har bevisats teoretiskt att det är möjligt genom en automatiserad process, omorientera samt låsa varierande cylindriska föremål med grov yta i olika positioner.

5.2 Analys av kravspecifikation

☒	Konstruktionen ska möjliggöra grepp om olika dimensioner	12-25mm

På gripenheten finns det utrymme för ett armeringsjärn med diameter 25 mm dessutom ytterligare utrymme för att roboten ska ha frihet att rotera när armeringsjärnet ligger i gripklon men inte gripcylindern är aktiv. Gripcylindern har en slaglängd på 30 mm vilket möjliggör hanteringen av armeringsjärn med diameter 12 mm upp till 25 mm.

☒	Konstruktionen ska klara av att bära armeringsjärn under förflyttning	15kg

I kap 3.4.1 genomfördes beräkningar som bekräftar att belastningens kan hanteras. I beräkningarna utfördes ett extremfall där ett C-järn skulle hanteras och den begärda kraften är högre. I beräkningarna undersöktes vikten 15,4 kg.

☒	Konstruktionen ska ha möjlighet att rotera armeringsjärn radiellt	90°

Via en linjär-roterande rörelse möjliggörs en rotation till 90° från ursprungspositionen.

☒	Konstruktionen skall kunna hitta samt gripa armeringsjärn inom ett intervall	±5mm

Under kapitlet 4.4.1 beskrivs utvecklingen av gripenheten där valet av den pneumatiska cylindern bidrog till att ett intervall för armeringsjärnet var möjligt.

☒	Vikten på verktyget (inkl. bärande vikt) får inte överstiga robotens bärkapacitet	40kg

Vikten på verktyget (inklusive vikt på armeringsjärn) skulle inte överstiga bärkapaciteten på industriroboten. Slutkonceptet resulterade i 22,5 kg inkl. armeringsjärn (se tabell 15) enligt Solid Works och produkternas datablad.

☒	Konstruktionen ska anpassas efter fästeanordningen på en verktygskopplare, RSP0109.	

På baksidan av höljet finns hål anpassat för monteringskruvar hos verktygskopplaren RSP0109 samt öppningar för slangar från pneumatiska cylindrarna.

☒	Konstruktionens bredd ska anpassas efter fixturstationens samt armeringsburens utrymme	< 110 mm i bredd

Konstruktionens bredd är totalt 107 mm och faller precis inom gränserna för uppgiften.

☒	Konstruktionens storlek ska anpassas efter den specifika armeringsbur som tilldelats av Skanska	< 70 mm under armeringsjärn < 70 mm framför armeringsjärn < 120 mm ovanför armeringsjärn

Eftersom axel 6 har möjlighet att rotera verktyget har de krav som ställts på geometrin fallit innanför ramarna när verktyget är upp och ner. Då kraven som ställs inte behandlar verktyget efter en rotation så krävs ingen speciell startposition för robotens axel 6. (se verktygets ritningar i bilaga 12)

☐	Konstruktionens storlek efter rotation ska anpassas efter den specifika armeringsbur som tilldelats av Skanska	< 200 mm ovanför armeringsjärn

Verktygets storlek är inom ramarna både i robotens ursprungsläge och när den är vänd upp och ned (se bilaga 12).

☒	Konstruktionen ska klara av momentet som uppstår från armeringsjärnet	37,5Nm

Med de beräkningar som genomförts i kap 3.4.1 och testet för polyuretan-stavarna i kap kan konstruktionens utformning bekräftas gällande momentkraften från armeringsjärnet.

☒	Tåla minimal temperatur	0°C
☒	Tåla maximal temperatur	50 °C

De komponenter som blivit konstruerade för den specifika uppgiften har inga kritiska begränsningar när det gäller temperatur. Enligt standardkomponenternas datablad kan den önskade temperaturen intygas (se bilaga 9 & 10).

☒	Tåla fukt	<CRC2

Alla komponenter som speciellt framtagits för denna uppgift är korrosionsbeständiga och alla standardkomponenter har valbara tillägg som även möjliggör en sådan funktion.

☒	Kablar och slangar ska förhindras från trassel

Slangar som används i slutkonceptet är inneslutna av höljet i ursprungsläge och är fastklämda i slanghållare för att minimera risken för trassel. Även flexibla band drar ständigt slangarna mot höljet under rotation för att minska klämrisker vid cylinderkolven.

6 SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER

6.1 Slutsatser

Syftet med examensarbetet var att utifrån en djup analys av problemet konstruera ett konceptförslag för att möjliggöra ett flertal moment i en automatiserad process för tillverkning av armeringsbur.

Genom att analysera varje moment i robotens förlopp kunde en uppfattning erhållas om vad konceptförslaget skulle ha för geometri, vilket var den största utmaningen under arbetet. På grund av det begränsade utrymmet behövdes många koncept vidare analyseras för att bekräfta storleken på komponenterna. Majoriteten av konceptförslagen kunde elimineras på grund av kravet på verktygets storlek.

Slutkonceptet resulterade i användning av kompakta komponenter där pneumatik var ett mest gynnsamt val av media. Då pneumatik är välkänt för att användas vid utrymmessnåla applikationer samt där höga krav ställs på vikten kunde den externa sökningen för komponenter begränsas.

Newtons tredje lag (om en kraft appliceras på ett föremål skapas en normalkraft som är lika stor) utnyttjades genom att använda en linjär enhet för gripfunktionen. Detta gjorde att kraften på cylindern behövde vara hälften så stor som ett standardgripdon. Eftersom den pneumatiska cylindern är den komponent som i nuläget är bredast är det faktorn som avgör verktygets bredd. Om ett standardgripdon med den dubbla kraften hade använts skulle verktyget inte hålla sig inom de specificerade kraven.

Genom att använda sig utav en linjär-roterande rörelse för att uppnå en rotation i verktyget öppnades stora möjligheter för att växla kraften. Kolvgauffästet gjordes löstagbart för att i eventuella framtida förändringar möjliggöra andra utväxlingar för att sedan monteras i de skruvar som finns tillgängliga på gripklon.

Rotationen på verktyget kommer inte i alla tillverkningsmoment vara aktiv och eftersom större krav på geometrin ställs på verktyget i ursprungsläge utnyttjades detta i slutkonceptet. Detta gjorde att robotens körningar enklare kunde planeras när inte rotationen var aktiv.

Slutkonceptet är baserat på en specifik armeringsbur som tilldelats från Skanska. Målet med projektet att automatisera tillverkningen av en armeringsbur är att i lång sikt att ha tillgång till tillräckligt med verktyg att möjliggöra alla konstruktioner av armeringsburar. Verktyget som examensarbetet har resulterat i kan användas till armeringsburar som har samma eller vidare begränsningar än den tilldelade konstruktionen. Av denna anledning har verktyget utformats så att alla komponenter är löstagbara och kan ersättas för att möjliggöra hanteringar i andra armeringsburar.

6.2 Rekommendationer

6.2.1 Robotsimulering

För att bekräfta att konstruktionen av slutkonceptet kommer att fungera i den tänkta robotkörningen bör konceptet testas i robotsimuleringar. Eftersom arbetet innefattar en analys av varje moment av robotens placeringar av armeringsjärn och inte robotens rörelse i helhet bör en fullständig simulation utföras för att analysera eventuella kollisioner utöver armeringens givna position. Även en plan för verktygets samt robotens startposition i varje moment bör genomföras för att möjliggöra alla moment samt effektivisera momenten.

6.2.2 Konstruktion & Datorstödd produktutveckling

Det rekommenderas att utföra mer detaljerade simuleringar för slutkonceptets konstruktion. De FEM-analyser som genomförts har varit i uppskattade extrempositioner och har varit i syfte att studera vissa specifika problem som kunde uppstå. Det bör även utföras simuleringar i hela förloppet av hanteringen av armeringsjärn, detta kräver alltså att alla robotmoment ska vara fastställda för att ha möjlighet att basera rörelsen på konstaterade robotförlopp.

Eventuella optimeringar för verktygets geometri kan även genomföras då det finns i nuläget ett stort utrymme med luft innanför höljet som inte fyller någon funktion. Genom att optimera verktygets geometri kan även robotförloppet effektiviseras då mindre begränsningar behövs iakttas. På grund av att arbetet inte innefattade någon effektivisering av robotförloppet eller hanteringen av andra armeringsburar har detta inte haft någon påverkan på resultatet.

6.2.3 Praktiska tester

Det resultat som examensarbetet lett till har baserats på mestadels teoretiska studier och bör därför även testas i praktiken. Eftersom robotsystemet erhåller en acceleration på 1 m/s^2 som examensarbetet har behandlat krävs även tester för grepp med polyuretan under den givna accelerationsrörelsen. Då arbetet inte behandlade armeringsjärnets dynamiska förhållanden kan även andra aspekter såsom vibrationer eller nedböjningar påverka verktygets funktion och bör därför analyseras.

6.2.4 Nya frågeställningar

Då arbetet behandlade hanteringen av armeringsjärn med *ett* avancerat verktyg behövdes stora krafter som behöll armeringsjärnet horisontellt. Genom att flera robotar skulle ha avancerade verktyg som tillåter rotation och gemensamt bibehåller armeringen horisontellt behövs endast en tredjedels kraft på varje verktyg. På grund av armeringens nedböjning uppfattar roboten att den har kolliderat då verktygen ständigt vill dras emot varandra. Genom att applicera ett grepp som låter armeringsjärnet att löpa längs med järnet men ändå motstå den momentkraft som uppstår kan verktygets storlek och vikt minskas. En ny frågeställning som uppkom under studierna var:

Kan ett grepp appliceras på ett armeringsjärn som motstår en given momentkraft, men ändå låta armeringsjärnet löpa i längs med järnet?

LITTERATURFÖRTECKNING

- ABB. (den 20 04 2016). Hämtat från Industrirobotar: <http://new.abb.com/se/om-abb/teknik/abb-teknik-som-forandrade-varlden/industrirobotar>
- ABB. (den 20 04 2016). Hämtat från IRB4600 Launch Brochure: <https://library.e.abb.com/public/2d7f1116daf0d1a8c12574e3006f5cd3/IRB4600LaunchBrochure.pdf>
- Adams Magnetic Products. (2016). Hämtat från Magnetic Assemblies & Devices: http://www.adamsmagnetic.com/magnetic_assemblies/assem_electromagnets.php
- Bark, L. (den 07 01 2009). Funktionsanalys. Hämtat från Zoomin IDT: <http://zoomin.idt.mdh.se/course/Produktutveckling/funktionsanalys.asp>
- Bark, L. (den 07 01 2009). Verb och Substantiv för funktionsanalys vid produktutveckling. Hämtat från Zoomin IDT: http://zoomin.idt.mdh.se/course/Produktutveckling/funk-ex_verb_subst.asp?
- Begroup. (den 21 04 2016). Hämtat från Armeringshandboken: http://www.begroup.com/upload/Sweden/Broschyrer/Armeringshandboken_2012_low.pdf
- Byggekatalogen. (den 04 12 2014). Hämtat från Armering: <http://byggekatalogen.byggtjanst.se/byggbakta/armering/1>
- Compotech. (2016). Hämtat från Elektromagneter: <http://compotech.se/produkter/magnetiskt/elektromagneter/>
- Direct industry. (2016). Hämtat från Linear rack and pinion: <http://www.directindustry.com/prod/cross-morse/product-20096-55133.html>
- Direct Industry. (2016). Hämtat från Wormgear: http://img.directindustry.com/images_di/photo-g/7869-2615867.jpg
- Example Gantt Chart. (2014). Hämtat från Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/File:PERT_example_gantt_chart.gif
- Festo. (2016). Hämtat från Corrosion resistance classes: https://www.festo.com/cms/sv_se/12787.htm
- Festo. (2016). Hämtat från Products: https://www.festo.com/cat/sv_se/products
- Friction & Frictions coefficients. (2016). Hämtat från Engineering Toolbox: http://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d_778.html
- Gates. (2016). Hämtat från Crimpers & Equipment: <http://www.gates.com/products/industrial/industrial-hydraulics/crimpers-and-equipment>
- Google Patent. (2011). Hämtat från Adjustable gripping tool: <http://www.google.com/patents/US7992470>
- Google Patent. (2013). Hämtat från Apparatus for gripping and holding diagnostic cassettes: <https://www.google.com/patents/US20130088031>

Greenfield, D. (2012). How to Decide Between Pneumatic and Electric Actuators. Hämtat från Automation World: <http://www.automationworld.com/motion-control-systems/how-decide-between-pneumatic-and-electric-actuators>

Gripper. (2016). Hämtat från TSI Solutions: <http://4tsi.com/products/pneumatic-actuators/grippers/>

Grippers. (2016). Hämtat från Festo: https://www.festo.com/cms/sv_se/15913.htm

Hose crimping machine - P20HP. (2016). Hämtat från Direct industry: http://img.directindustry.com/images_di/photo-g/17856-2829449.jpg

Introduction of Motion Studies. (2016). Hämtat från SolidWorksHelp: http://help.solidworks.com/2012/English/SolidWorks/motionstudies/c_introduction_to_motion_studies.htm

Kinematics Problems. (2016). Hämtat från Real world physics problems: <http://www.real-world-physics-problems.com/kinematics-problems.html>

Knipex polygrip. (2016). Hämtat från R-K Verktyg: <http://www.verktygsproffs.se/handverktyg/knipex-polygrip/>

LoggerHead Tools. (2016). Hämtat från <https://loggerheadtools.com/>

Mer isolering och armering. (2010). Hämtat från Spiksäkert: <https://spiksakert.wordpress.com/2010/05/30/mer-isolering-och-armering/>

Mälardalens Högskola. (den 02 01 2014). MDH. Hämtat från Problematisering: <http://www.mdh.se/student/minastudier/examensarbete/omraden/metoddoktorn/problem/problematisering-1.29641>

Robot Movement. (2011). Hämtat från Global Robots: http://www.globalrobots.ae/robot_guide/index.html

Robotdalen. (2016). Hämtat från Om Robotdalen: http://www.robotdalen.se/sites/default/files/media/documents/rd_vb2014_8sida4.pdf

Scotch yoke Mechanism. (2013). Hämtat från Youtube: https://www.youtube.com/watch?v=_K4PSV4MO70

Scroll Chucks. (2016). Hämtat från Peter Child: <http://www.peterchild.co.uk/chucks/scrollchuck.htm>

Simulation. (2016). Hämtat från SolidWorks: <https://www.solidworks.com/sw/products/simulation/simulation-professional.htm>

Skanska. (2016). Hämtat från Om Skanska: <http://www.skanska.se/sv/Om-Skanska/>

Skanska. (2016). Hämtat från Hållbarhet: <http://www.skanska.se/sv/Om-Skanska/Prioriterade-omraden/Hallbarhet/>

Skövde Ridsport. (2016). Hämtat från Bionic Wrench "Broddnyckel": <http://www.skovderidsport.se/bionic-wrench-broddnyckel.html>

Svenskbetong. (2014). Hämtat från Pumpmanual: <http://www.svenskbetong.se/images/pdf/Pumpmanual-2014-version-16juni.pdf>

Taper Mount Heavy Duty Drill Chuck. (2016). Hämtat från Fastenal:
<https://www.fastenal.com/products/details/3199117>

Ulrich, & Eppinger. (2012). Product Design and Development.

What is a Pugh Matrix? (2016). Hämtat från Modern analyst:
<http://www.modernanalyst.com/Careers/InterviewQuestions/tabid/128/ID/2159/What-is-a-Pugh-Matrix.aspx>

Viktor, E., & Victor, P. (2010). Prefabricerade betongbroar - är det möjligt? Halmstad.

Wood Magazine. (2016). Hämtat från How a chuck grips:
<http://my.woodmagazine.com/woodworking-tips/techniques/woodturning/four-jaw-lathe-chucks/?page=4>

BILAGOR

BILAGA 1 – IRB4600

BILAGA 2 - VERKTYGSVÄXLARE MED SVIVEL

BILAGA 3 – DEN AUTOMATISKA TILLVERKNINGSPROCESSENS STEG

BILAGA 4 – GANTT-SCHEMA

BILAGA 5 – STANDARDGRIP

BILAGA 6 – LOGGERHEAD TOOLS, BILDER FRÅN PATENTBAS

BILAGA 7 – GRIPKLO FÖR KASSETTER, BILDER FRÅN PATENTBAS

BILAGA 8 – GLIDLAGER, PTFE

BILAGA 9 – CYLINDER FÖR GRIPFUNKTION, ADN-80-30-I-P-A-R3

BILAGA 10 – CYLINDER FÖR ROTATIONSFUNKTION, ADN-50-120-I-P-A-R3

BILAGA 11 – FULLSTÄNDIGA SIMULERINGAR

BILAGA 12 – RITNINGAR PÅ SLUTKONCEPT

BILAGA 1 – IRB4600

Robotics

IRB 4600 Industrial Robot

The IRB 4600 is a pioneer of the sharp robot generation; with enhanced features and new capabilities. The design has been optimized to make it superior for the targeted applications. The IRB 4600 enables more compact manufacturing cells with increased production output and higher quality - and that means improved productivity.

Sharpest accuracy

With the best accuracy in its class, the IRB 4600 can help you increase output with higher process speeds and lower scrap rates, resulting in improved productivity. This is particularly useful in materials handling, dispensing, machining, measuring, assembly and welding applications. In addition, the programming time is minimized since what you program is what you get, and that in the shortest possible cycle time. This is useful in all applications to shorten commissioning times and minimize production stops when new programs or work pieces are introduced.

Shortest cycle times

Thanks to the new compact and optimized design resulting in a low weight, the IRB 4600 can cut the cycle times of the industry benchmark by up to 25%. The maximum acceleration achievable is highest in its class, together with high maximum speeds. The high acceleration is possible to use to avoid obstacles or to follow the path. The benefit is increased production capacity and higher productivity.

Ultra-wide working range

You can position the IRB 4600 in the most favourable way with regard to reach, cycle time and auxiliary equipment. Flexible mounting with floor, tilted, semi-shelf or inverted mounting is very useful when you are simulating the best position for your application.



Compactness

The small footprint, the slim swing base radius around axis 1, the fine elbow behind axis 3, the small lower and upper arms, and the compact wrist all contribute to the most compact robot in its class. With the IRB 4600 you can create your production cell with reduced floorspace by placing the robot closer to the served machines, which also increases your output per m² and your productivity.

Best protection available

ABB has the most comprehensive protection program on the market and it will be even further enhanced with the IRB 4600. Foundry Plus includes IP 67, resistant paint, rust-protected mounting flange and protection for molten metal spits on non-moving cables on the rear of the robot and extra protection plates over the floor cable connections on the foot.

Optimize and go sharp

To get the IRB 4600 ready for the targeted applications you have access to high performing workpiece positioners, Track motions, and the motor unit range.

To simulate your production cell to find the optimal position for the robot and program it offline, RobotStudio is available on subscription together with PowerPacs for several applications.

If you would like to learn more about how to use the IRB 4600 in your applications and environments, you can watch simulations on several applications at www.abb.com/robotics

Power and productivity
for a better world™ **ABB**

Figur 77 - Information för ABB-industriroboten IRB4600

IRB 4600

Main applications

Machine tending, Material handling, Arc welding, Cutting, Dispensing, Assembly, Palletizing and packing, Measuring

Specifications

Variant:	Reach	Payload	Armload
IRB 4600-60/2.05	2.05 m	60 kg	20 kg
IRB 4600-45/2.05	2.05 m	45 kg	20 kg
IRB 4600-40/2.55	2.55 m	40 kg	20 kg
IRB 4600-20/2.50	2.51 m	20 kg	11 kg
Number of axes:	6+3 external (up to 36 with MultiMove)		
Protection:	Standard IP67, as option Foundry Plus 2		
Mounting:	Floor, shelf, inverted or tilted		
IRC5 Controller variants:	Single cabinet, Dual cabinet		

Physical

Dimensions robot base:	612 x 676 mm
Robot height: IRB 4600-60/2.05 and IRB 4600-45/2.05	1727 mm
Robot height: IRB 4600-40/2.55 and IRB 4600-20/2.50	1802 mm
Robot weight:	412 to 435 kg

Performance

Position repeatability (PR)	0.05 - 0.06 mm
Path repeatability (PT)	0.13 - 0.48 mm (measured at speed 250 mm/s)

Movement

Axis movement:	Working range:	Maximum speed:
Axis 1	+180° to -180°	175°/s
Axis 2	+150° to -90°	175°/s
Axis 3	+75° to -180°	175°/s
Axis 4	+600° to -600°	250° (20/2.50 has 360°/s)
Axis 5	+120° to -120°	250° (20/2.50 has 360°/s)
Axis 6	+600° to -600°	360° (20/2.50 has 500°/s)

* Axis 5 for IRB 4600-20/2.50 +120°/-120°

Electrical connections

Supply voltage:	200-600 V, 50-60 Hz

Environment

Ambient temperature for mechanical unit

During operation:	+5° C (41° F) to +45° C (113° F)
During transportation and storage:	-25° C (-13° F) to +55° C (130° F)
For short periods (max 24 h):	up to +70° C (158° F)

Relative humidity: Max 95%

Safety:	Double circuits with supervision, emergency stops and safety function, 3-position enable device

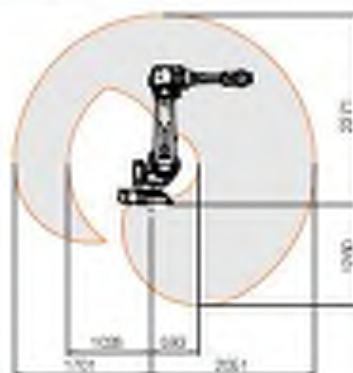
Emission: EMC/EMC shielded

Data and dimensions may be changed without notice.

Working range

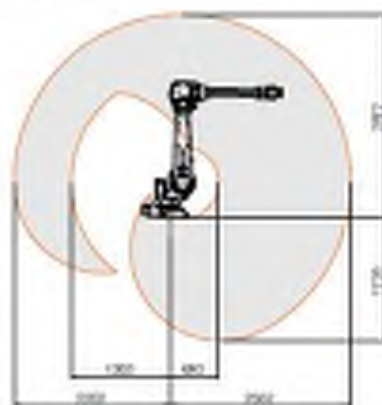
IRB 4600-60/2.05

IRB 4600-45/2.05



IRB 4600-60/2.05
IRB 4600-45/2.05

IRB 4600-40/2.55



IRB 4600-20/2.50



Power and productivity
for a better world™

ABB

www.abb.com/robotics

Figur 78 - Information für ABB-Industriroboten IRB4600



Small Swivels with Tool Changers




Swivels with Tool Changers

The swivels with Tool Changer combines the best of both worlds to maximize the flexibility and productivity. Proven and robust design ensures the highest possible reliability without limiting the robots performance or working range. These products are the obvious choice in applications that involve welding guns or material handling tools and a lot of robot movement.

Advantages:

- No limitation of robot working range
- Easier to reach tight positions thanks to fixed hosing and slim design
- Low maintenance
- Forgiving locking device
- Fast docking due to smart design
- Easy to switch connecting pins

Technical data

Tool Changer	Part no.	Handling capacity (kg)	Electrical channels	Air channels	Weight (kg)	Corresponding Tool Attachment	Part no.	Weight (kg)	Max moment (Nm)
STC20-4	P0106	20	-	4	0.8	TA20-4	P0102	0.3	150
STC20-4E	P0108	20	6	4	1.0	STA20-4E	P0109	0.4	150

P0141 Square tool attachment bracket

Electrical channels

Max voltage	60 V *
Max current	1 A *
Connections	M12 / Cable

* Other spec. available on request.

Compressed air

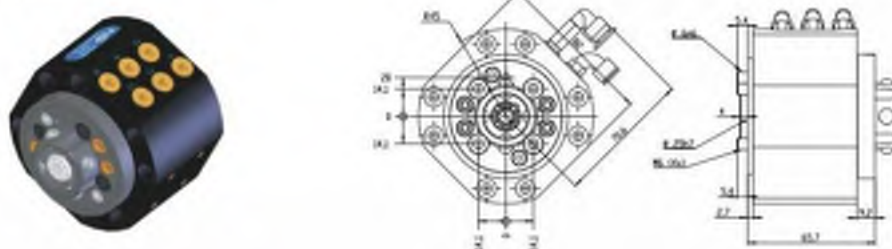
Max. compressed air	-1 to 10 bar
Tool change function	6-10 bar
Air flow, unregulated outflow	150 l/min, free, Pin = 6.0 bar
Air quality	Oil-clean and waterless filtered air, max 25 µm
Air connections	M5



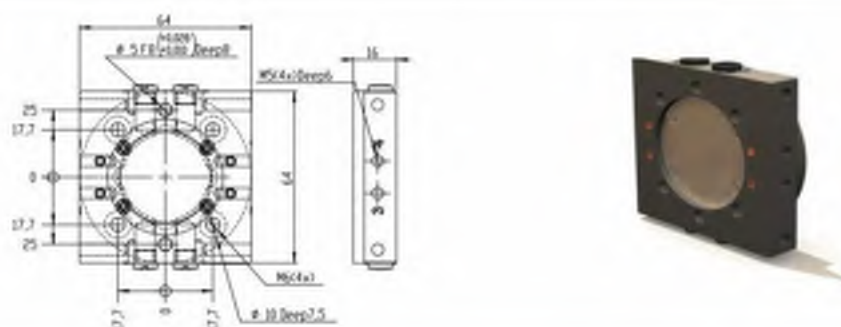
Figur 79 - Produktinformation för verktygsväxlare och svivel

Dimensional drawings

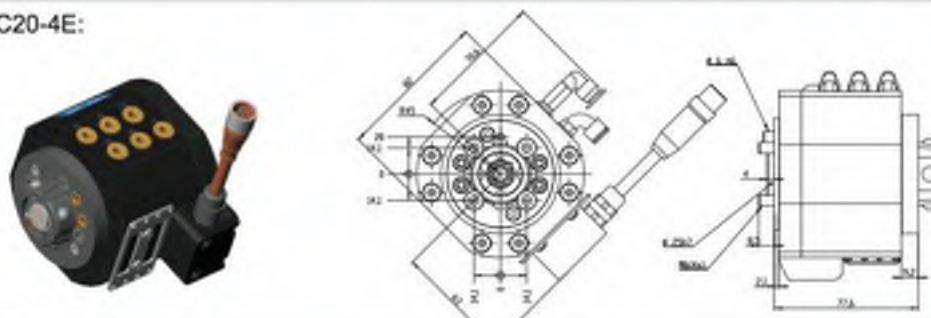
STC20-4:



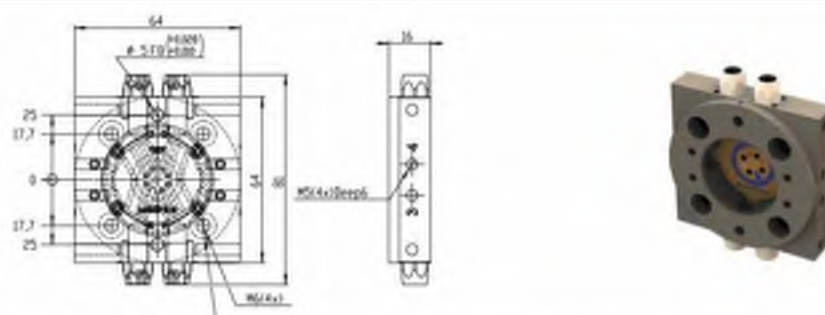
TA20-4:



STC20-4E:



STA20-4E:



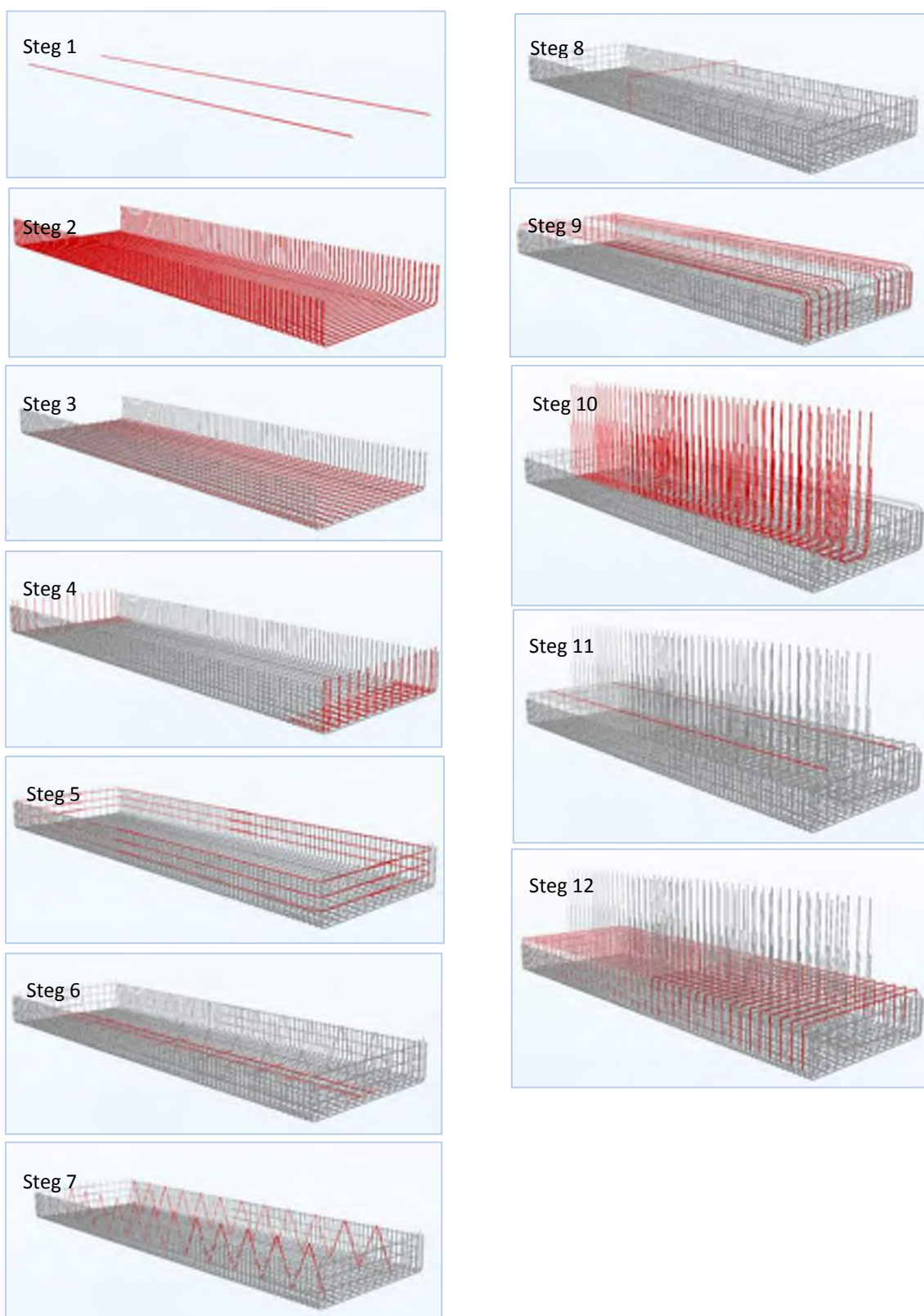
80102-1, Jan 2006

Robot System Products AB offers complete, standardized media supply solutions for most robot-based automation. We design, manufacture, and market a widerange of standard robot peripherals such as tool changers, swivels, hose packages, vacuum grippers and die-casting systems throughout the world. Visit us at www.robotssystemproducts.com

rsp robot system
products

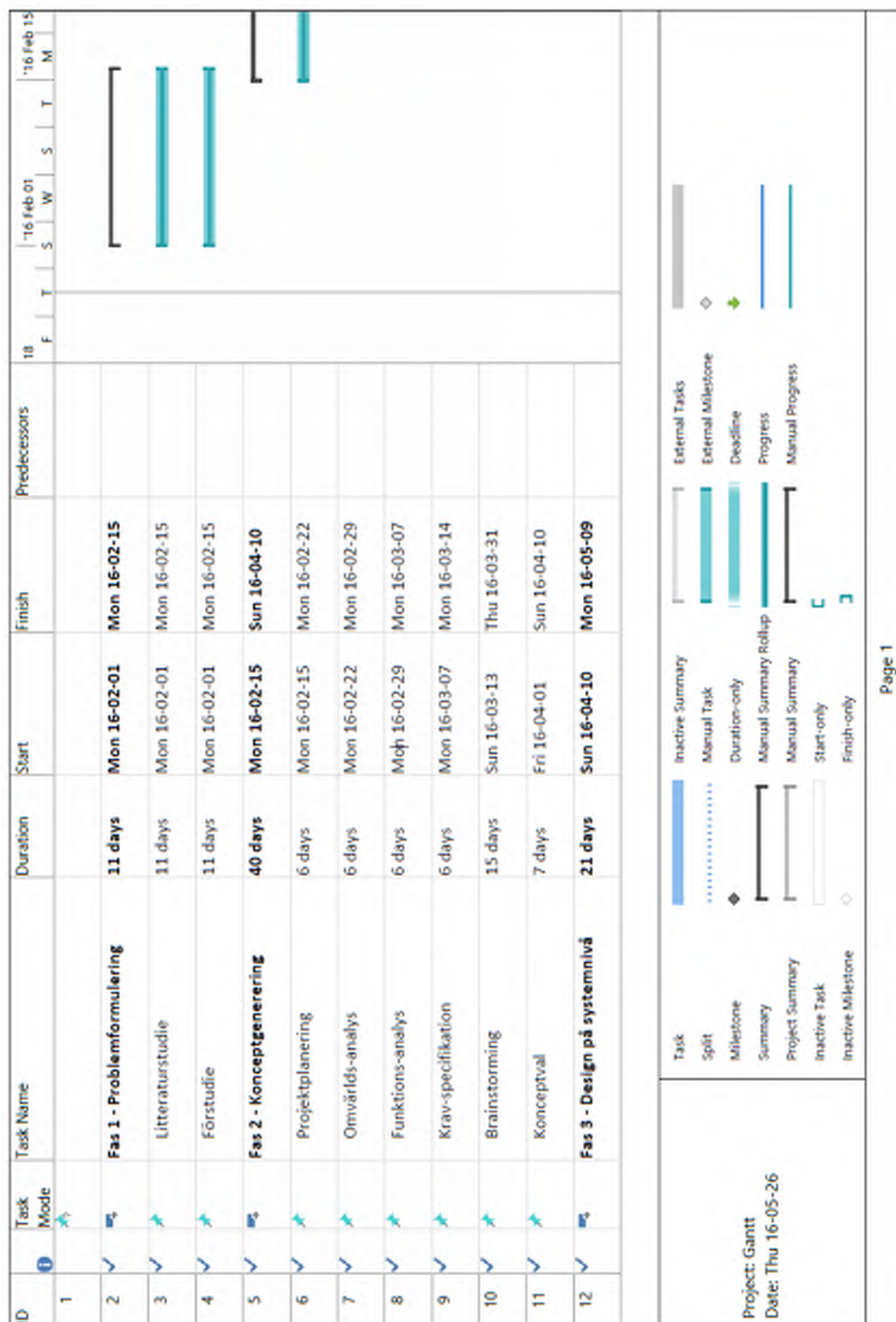
Figur 80 - Ritningar för verktygsväxlare och svivel

BILAGA 2 – DEN AUTOMATISKA TILLVERKNINGSPROCESSENS STEG

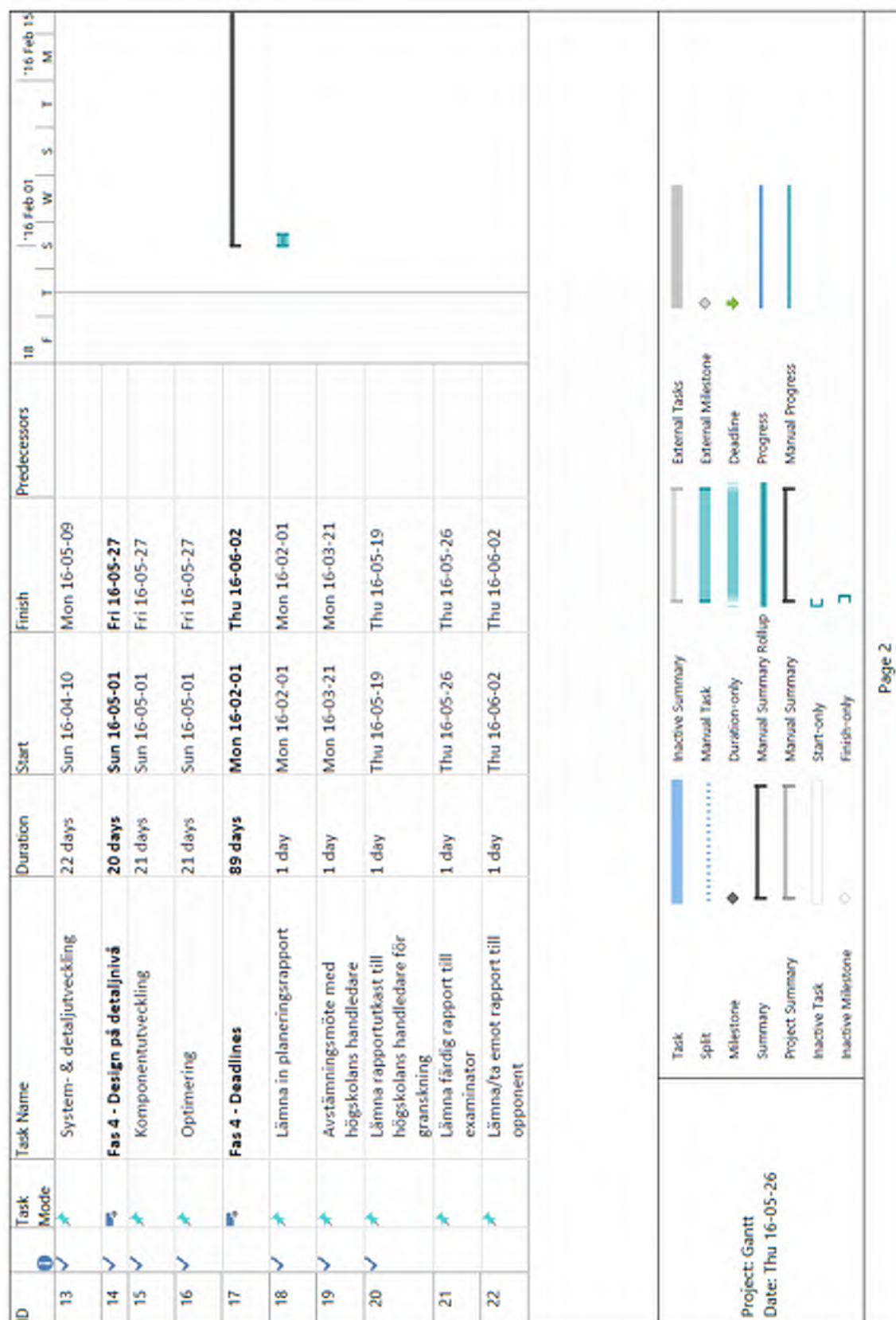


Figur 81 - Den tänkta automatiska processens moment

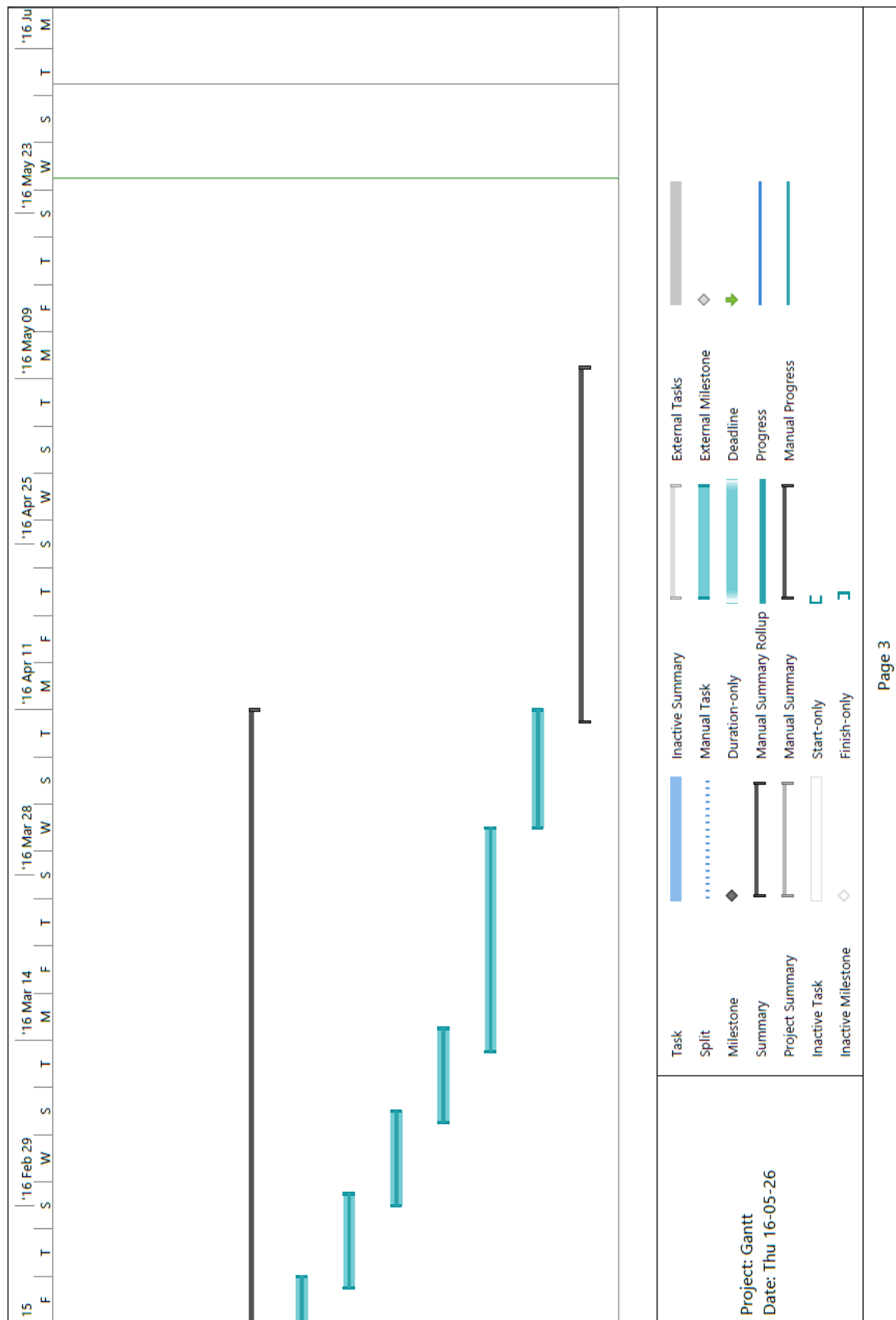
BILAGA 3 – GANTT-SCHEMA



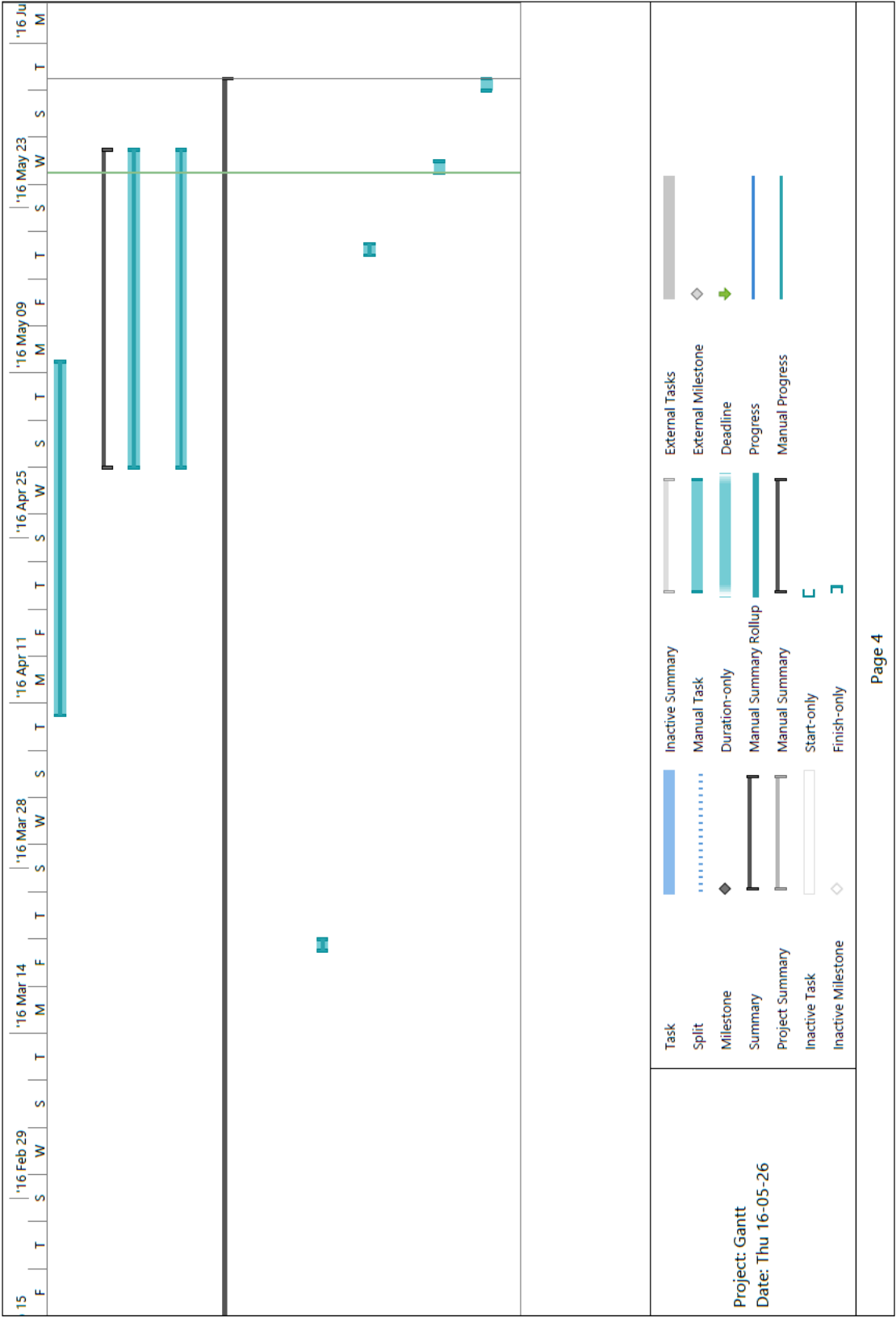
Figur 82 - Gantt-schema ur Office Project Professional, sida 1



Figur 83 - Gantt-schema ur Office Project Professional, sida 2



Figur 84 - Gantt-schema ur Office Project Professional, sida 3



Figur 85 - Gantt-schema ur Office Project Professional, sida 4

BILAGA 4 – STANDARDGRIP

Grippers

Standard grippers

Economical gripping for all standard applications



Parallel gripper DHP5

Gripper with load-bearing T-slot guide

- High gripping force at a small size
- Total opening stroke max. 25 mm

[More about the parallel gripper DHP5](#)



Three-point gripper DHDS

Grippers with T-slot guide

- High gripping force with compact dimensions
- Gripping diameter max. 50 mm

[More about three-point gripper DHDS](#)



Radial gripper DHR5

- Lateral support of the gripper jaws even at high torque load
- Total opening angle 180°

[More about radial gripper DHR5](#)



Angle gripper DHWS

Optimised gripper jaw support

- Movement as slotted guide system
- Total opening angle 40°

[More about angle gripper DHWS](#)



Radial gripper HGRC and angle gripper HGWC

Compact and powerful design in three sizes with three opening angles

- Economical thanks to optimal price/performance ratio
- Constant gripping force due to rack and pinion design

→ [Radial gripper HGRC in the catalogue](#)

→ [Angle gripper HGWC in the catalogue](#)

Sturdy and sealed grippers

Precise and forceful gripping even under the toughest of conditions



Parallel gripper HGPT-B / HGPT-B-F

High torque resistance and long service life thanks to sturdy and precise T-slot guide

- Total gripping force up to 6,300 N with the high-force variant HGPT-F
- Reliable operation in harsh environments thanks to sealing air

More about parallel gripper HGPT-B / HGPT-B-F

→ Parallel gripper HGPT-B / HGPT-B-F in the catalogue



Sealed parallel gripper HGPD

Sturdy design with complete seal for high torque load

- Trouble-free operation in rough environments with dust and fluids
- Optimal space/force ratio and forced gripper jaw movement

More about the parallel gripper HGPD

→ Parallel gripper HGPD in the catalogue



Long-stroke gripper HGPL

Double-acting gripper with extra long T-slot guide

- Parallel and opposing drive pistons move the gripper jaws directly and without loss of force
- Faster processes due to adjustable opening stroke

More about long-stroke gripper HGPL

→ Long-stroke gripper HGPL in the catalogue



Three-point gripper HGDT / HGDT-F

High torque resistance and long service life

- Total gripping force up to 4,500 N with the high-force variant HGDT-F
- Gripping force backup ensures safety in the event of loss of compressed air

More about three-point gripper HGDT-F

→ Three-point gripper HGDT in the catalogue



Sealed three-point gripper HGDD

Sturdy design with complete seal for high torque load

- Trouble-free operation in rough environments
- Synchronous movement of gripper jaws thanks to forced guidance

More about three-point gripper HGDD

→ Sealed three-point gripper HGDD in the catalogue



Radial gripper HGRT

Precise and reliable even at high torque load due to long gripper fingers

- Long service life: approx. 10 million switching cycles
- Total opening angle freely adjustable (max. 180°)

More about radial gripper HGRT

→ [Radial gripper HGRT in the catalogue](#)

Flexible grippers

Gripping solutions for special requirements



Bellows grippers DHEB

Gentle and reliable internal gripping

- Gentle gripping and bellows material prevent scratching of workpieces
- Leak testing possible at the same time as the gripping process

More about bellows gripper DHEB

→ [Bellows gripper DHEB in the catalogue](#)



Electric parallel gripper HGPLE

Variable positioning and speed control

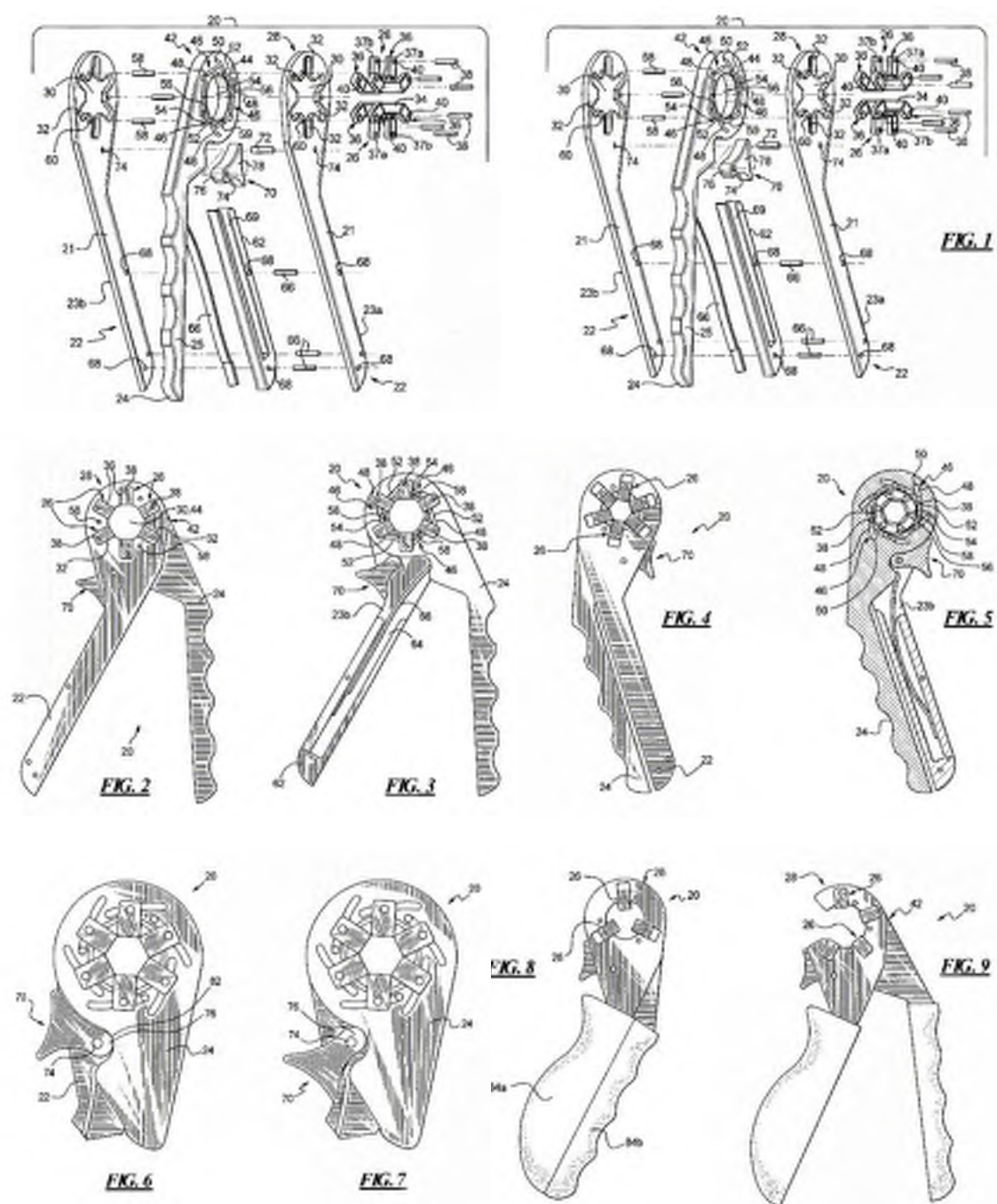
- Variable speed, force and stroke
- Reduced gripping times due to "pre-holding position"

→ [More about the electric parallel gripper HGPLE](#)

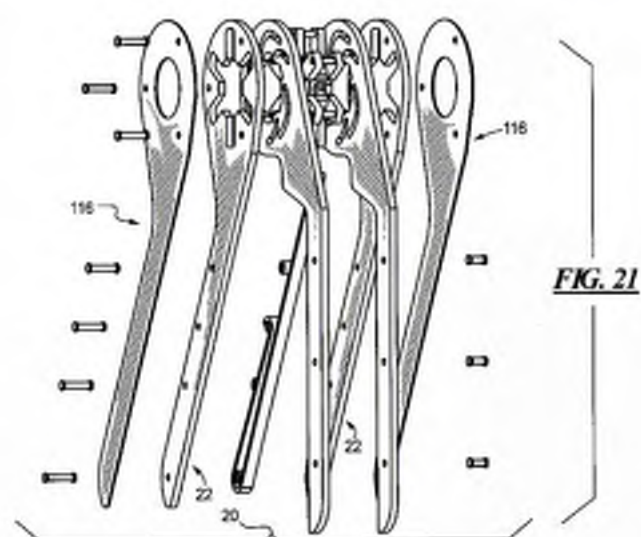
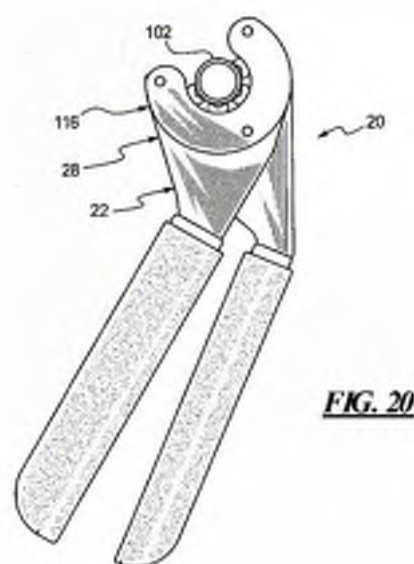
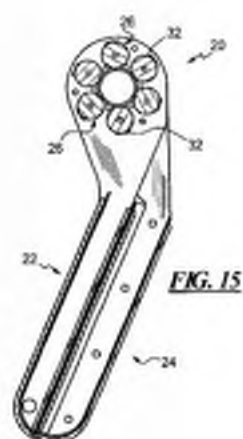
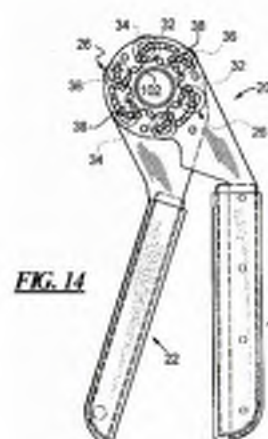
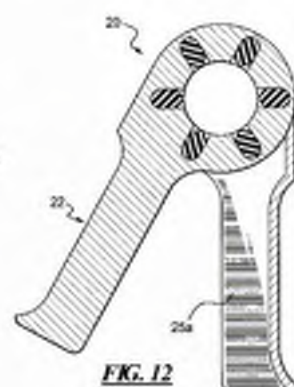
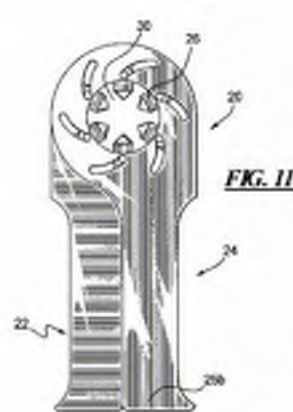
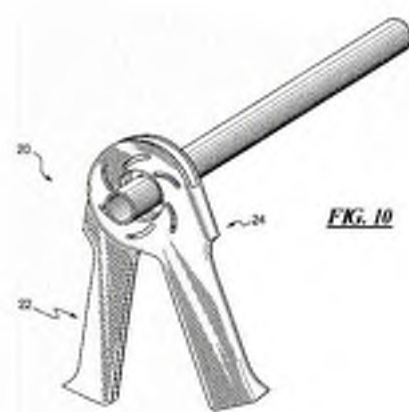
→ [Electric gripper HGPLE in the catalogue](#)

Figur 86 - Standardgripdon från FESTO (Grippers, 2016)

BILAGA 5 – LOGGERHEAD TOOLS, BILDER FRÅN PATENTBAS

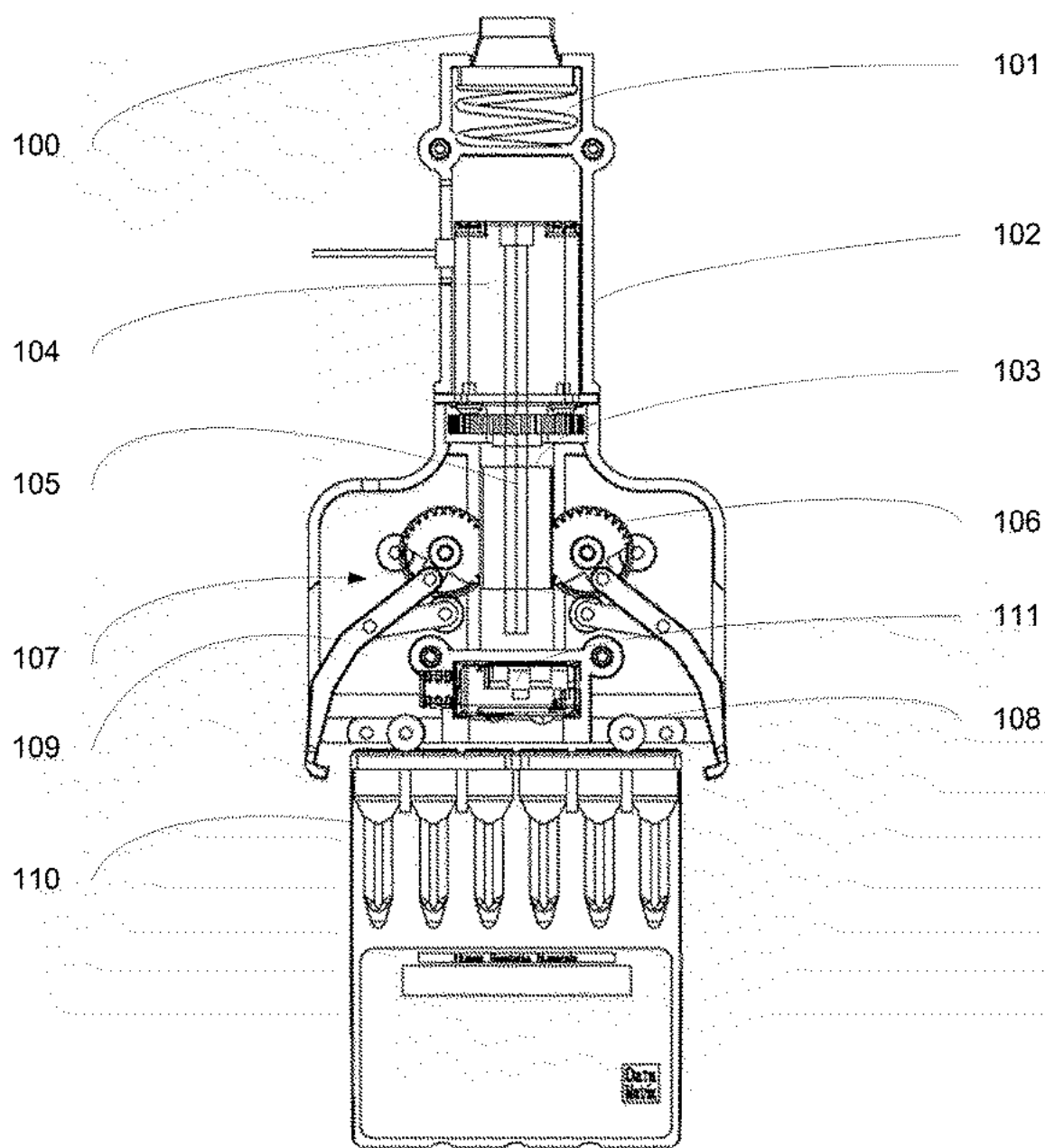


Figur 87 - Loggerhead patentbilder (Google Patent, 2011)



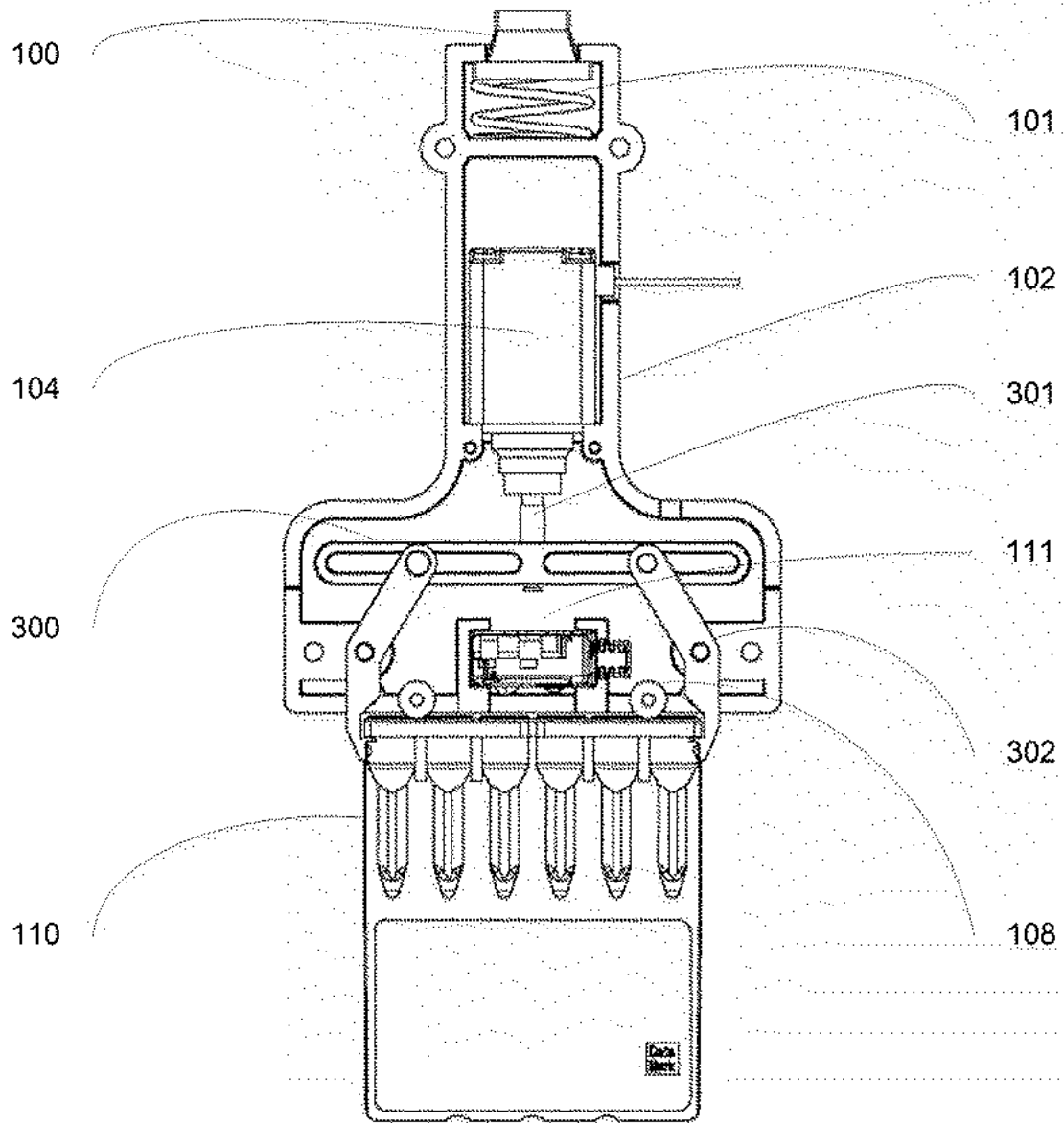
Figur 88 - Loggerhead patentbilder (Google Patent, 2011)

BILAGA 6 – GRIPKLO FÖR KASSETTER, BILDER FRÅN PATENTBAS



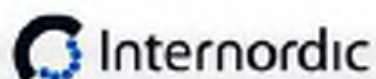
Figur 89 - Kassett-gripdon från patentbas (Google Patent, 2013)

Fig. 4 -- Configuration 2 Closed with Cassette



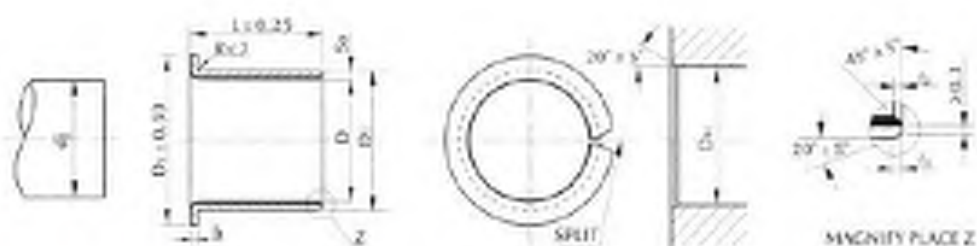
Figur 90 - Kassett-gripdon från patentbas (Google Patent, 2013)

BILAGA 7 – GLIDLAGER, PFTE



COB010F 15050

GLIDBUSSNING M. FLÄNS



Part No

COB010F 15050

Description

GLIDBUSSNING M. FLÄNS

Product Attribute	Ref	Value
Type		METRIC FLANGE BUSHING
L	L	5 mm
d	d	15 mm
b	b	1 mm
D1	D1	17 mm
D2	D2	23 mm
SB	SB	1 mm
f1	f1	0,6 mm
f2	f2	0,4 mm

Created: 2015-05-18 13:58:34

Address: Internordic
Box 105
671 22 Nässjö
Sweden

Phone: 075 24 24 940
Fax: 075 24 24 959
Web: www.internordic.com

Figur 91 - Glidbussning från Internordic

BILAGA 8 – CYLINDER FÖR GRIPFUNKTION, ADN-80-30-I-P-A-R3

Data sheet

Overall data sheet – Individual values depend upon your configuration.

Feature	values
Stroke	5 ... 500 mm
Piston diameter	80 mm
Based on the standard	ISO 21287
Cushioning	P: Flexible cushioning rings/plates at both ends PPS: Self-adjusting pneumatic end-position cushioning
Assembly position	Any
Design structure	Piston Piston rod Profile barrel
Position detection	For proximity sensor
Variants	EX protection approval (ATEX) Improved running performance Extended male piston rod thread special thread on piston rod Extended piston rod With protection against rotation Excellent corrosion protection Dust protection Constant slow movement Low-friction Through piston rod through, hollow piston rod Heat resistant seals, max. 120 °C laser etched rating plate Temperature range -40 - 80 °C Single-ended piston rod
Operating pressure	0.6 ... 10 bar
Mode of operation	double-acting
ATEX category Gas	II 2G
Explosion ignition protection type Gas	c I T4
ATEX category Dust	II 2D
Explosion ignition protection type Dust	c 120 °C
Explosion proof ambient temperature	-20 °C ≤ Ta ≤ +60 °C
Operating medium	Compressed air in accordance with ISO 8573-1:2010 (7.4.4)
Note on operating and pilot medium	Lubricated operation possible (subsequently required for further operation)
CE mark (see declaration of conformity)	to EU directive explosion protection (ATEX)
Corrosion resistance classification CRC	2 3
Ambient temperature	-40 ... 120 °C
Theoretical force at 6 bar, return stroke	2 827 N
Theoretical force at 6 bar, advance stroke	2 827 ... 3 016 N
Moving mass with 0 mm stroke	493 g
Additional weight per 10 mm stroke	79 g
Basic weight for 0 mm stroke	5 300 g
Additional mass factor per 10 mm of stroke	25 g
Mounting type	Optional with through hole with internal (female) thread with accessories
Pneumatic connection	G1/8
Materials note	Conforms to RoHS
Materials information for cover	Aluminum Anodised
Materials information for piston rod	High alloy steel
Materials information for cylinder barrel	Wrought Aluminium alloy Smooth anodised

Figur 92 - Produktinformation för gripcylindern

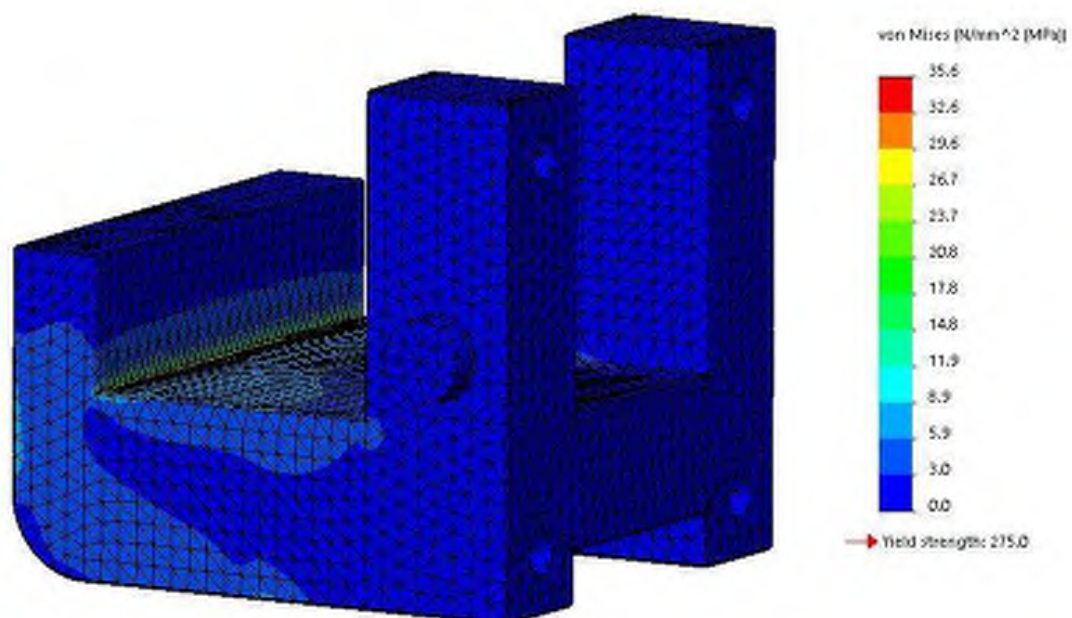
BILAGA 9 – CYLINDER FÖR ROTATIONSFUNKTION, ADN-50-120-A-P-A-R3

Feature	values
Stroke	1 ... 400 mm
Piston diameter	50 mm
Based on the standard	ISO 21287
Cushioning	P: Flexible cushioning rings/plates at both ends PPS: Self-adjusting pneumatic end-position cushioning
Assembly position	Any
Design structure	Piston Piston rod Profile barrel
Position detection	For proximity sensor
Variants	EX protection approval (ATEX) improved running performance Extended male piston rod thread special thread on piston rod Extended piston rod With protection against rotation Excellent corrosion protection Dust protection Constant slow movement Low-friction Through piston rod through, hollow piston rod Heat resistant seals, max. 120°C laser etched rating plate Temperature range -40 - 80 °C Single-ended piston rod
Operating pressure	0,6 ... 10 bar
Mode of operation	double-acting
ATEX category Gas	II 2G
Explosion ignition protection type Gas	c T4
ATEX category Dust	II 2D
Explosion ignition protection type Dust	c 120°C
Explosion-proof ambient temperature	-20°C ≤ Ta ≤ +60°C
Operating medium	Compressed air in accordance with ISO8573-1:2010 [7:4:4]
Note on operating and pilot medium	Lubricated operation possible (subsequently required for further operation)
CE mark (see declaration of conformity)	to EU directive explosion protection (ATEX)
Corrosion resistance classification CRC	2 3
Ambient temperature	-40 ... 120 °C
Theoretical force at 6 bar, return stroke	1.057 N
Theoretical force at 6 bar, advance stroke	1.057 ... 1.178 N
Moving mass with 0 mm stroke	140 g
Additional weight per 10 mm stroke	51 g
Basic weight for 0 mm stroke	540 g
Additional mass factor per 10 mm of stroke	16 g
Mounting type	Optional with through hole with internal (female) thread with accessories
Pneumatic connection	G1/8
Materials note	Conforms to RoHS
Materials information for cover	Aluminium Anodised
Materials information for piston rod	High alloy steel
Materials information for cylinder barrel	Wrought Aluminium alloy Smooth anodised

Figur 93 - Produktinformation för rotationscyklindern

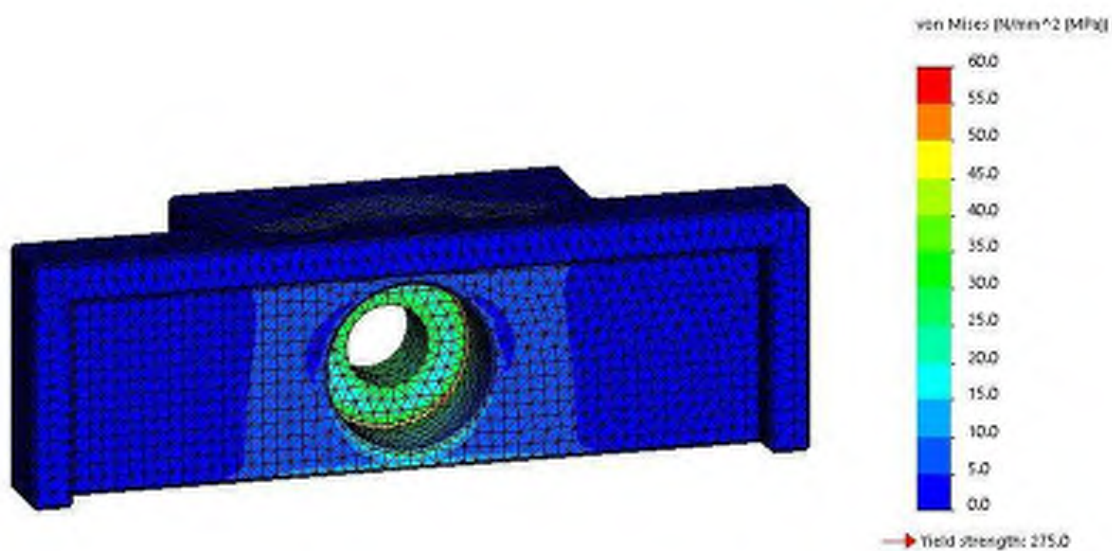
BILAGA 10 – FULLSTÄNDIGA SIMULERINGAR

Gripklo



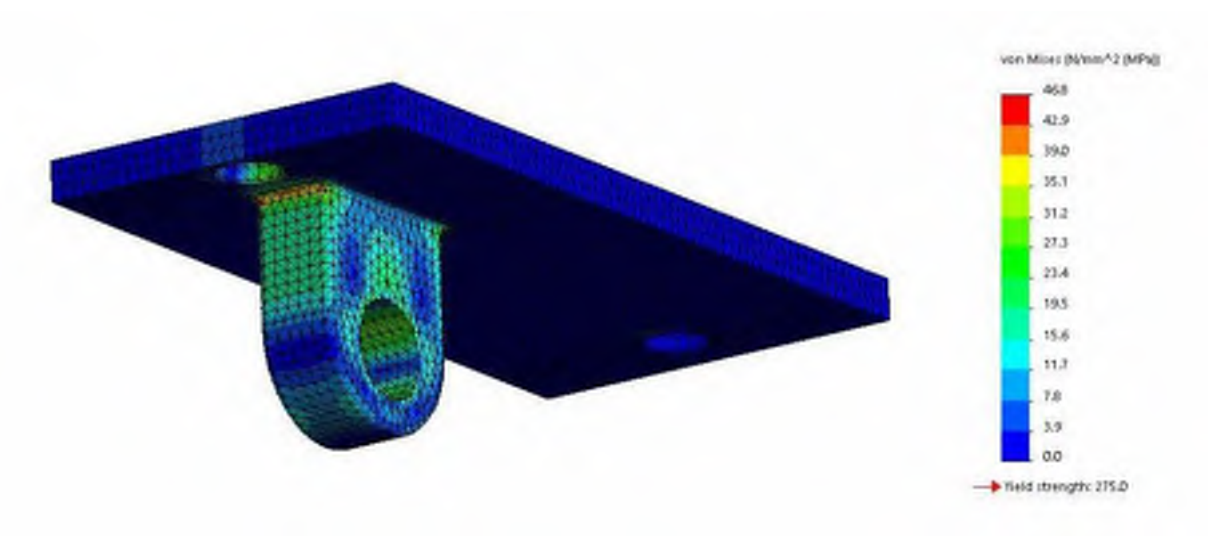
Figur 94 - Komplet simulering av gripklo

Polyuretanfäste



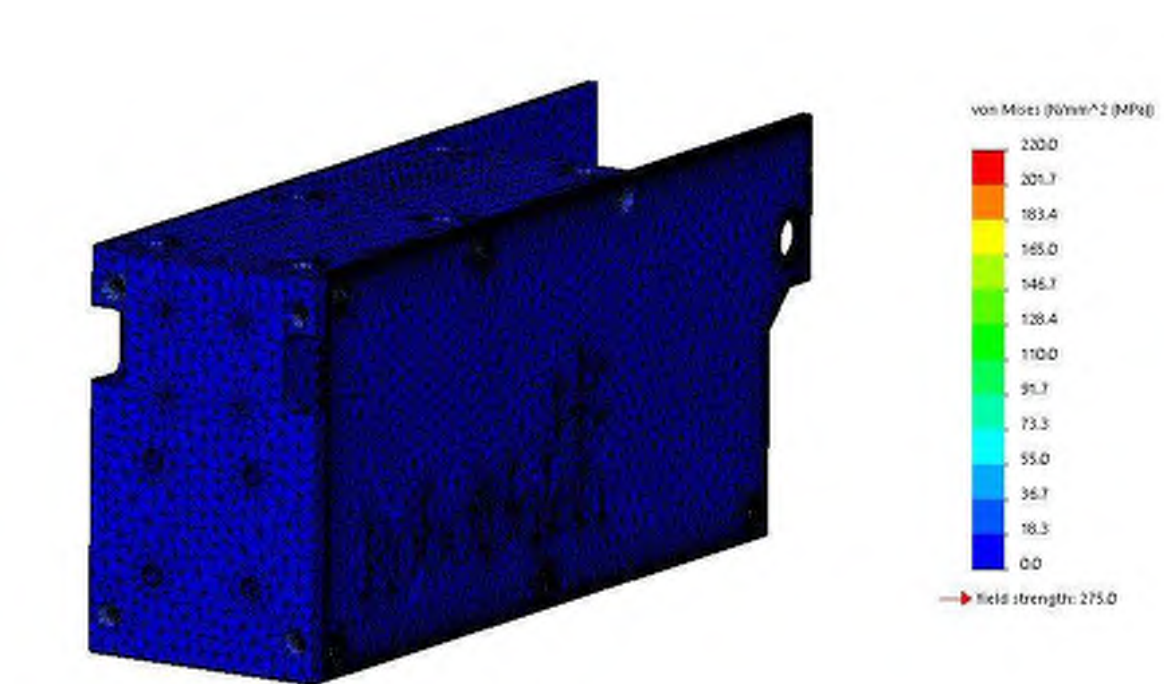
Figur 95 - Komplet simulering av polyuretanfäste

Fäste för kolvgaffel



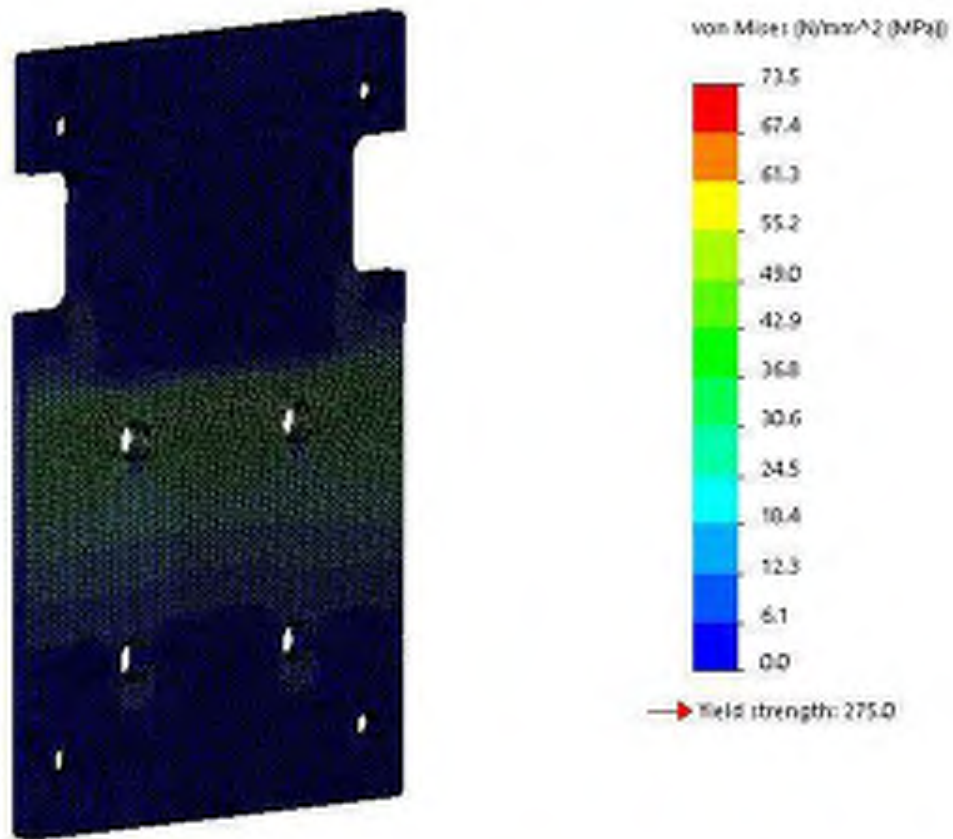
Figur 96 - Komplet simulering av fäste för kolvgaffel

Hölje



Figur 97 - Komplet simulering av hölje

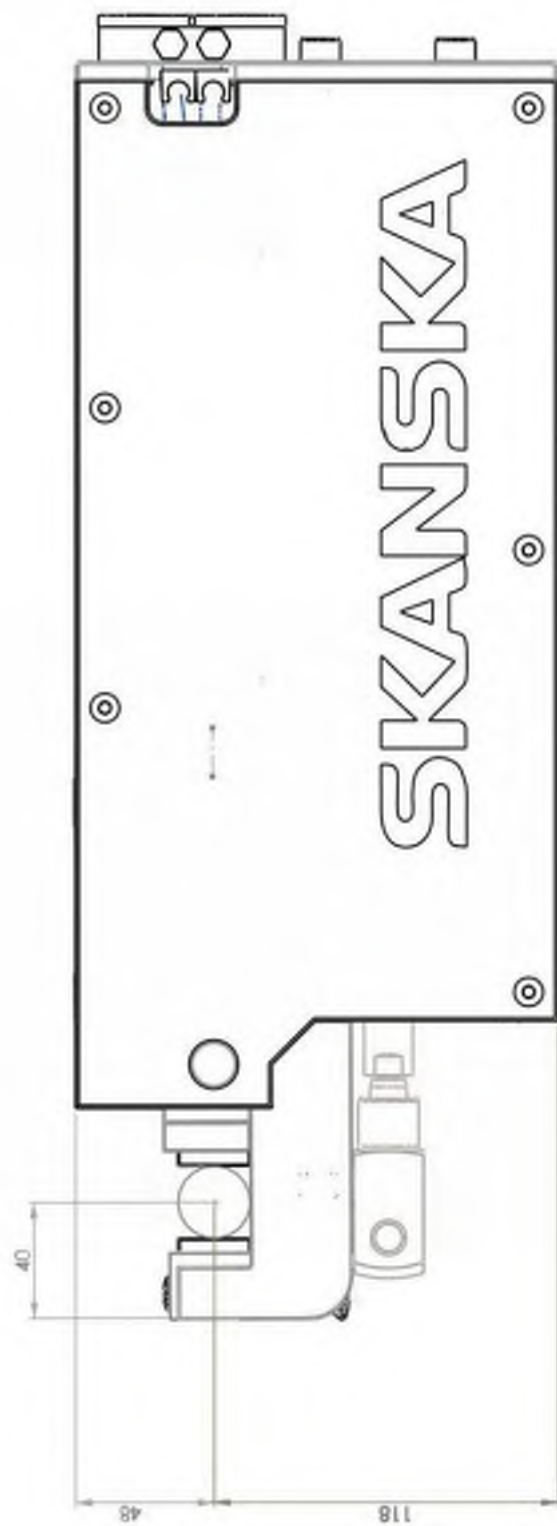
Bakplatta



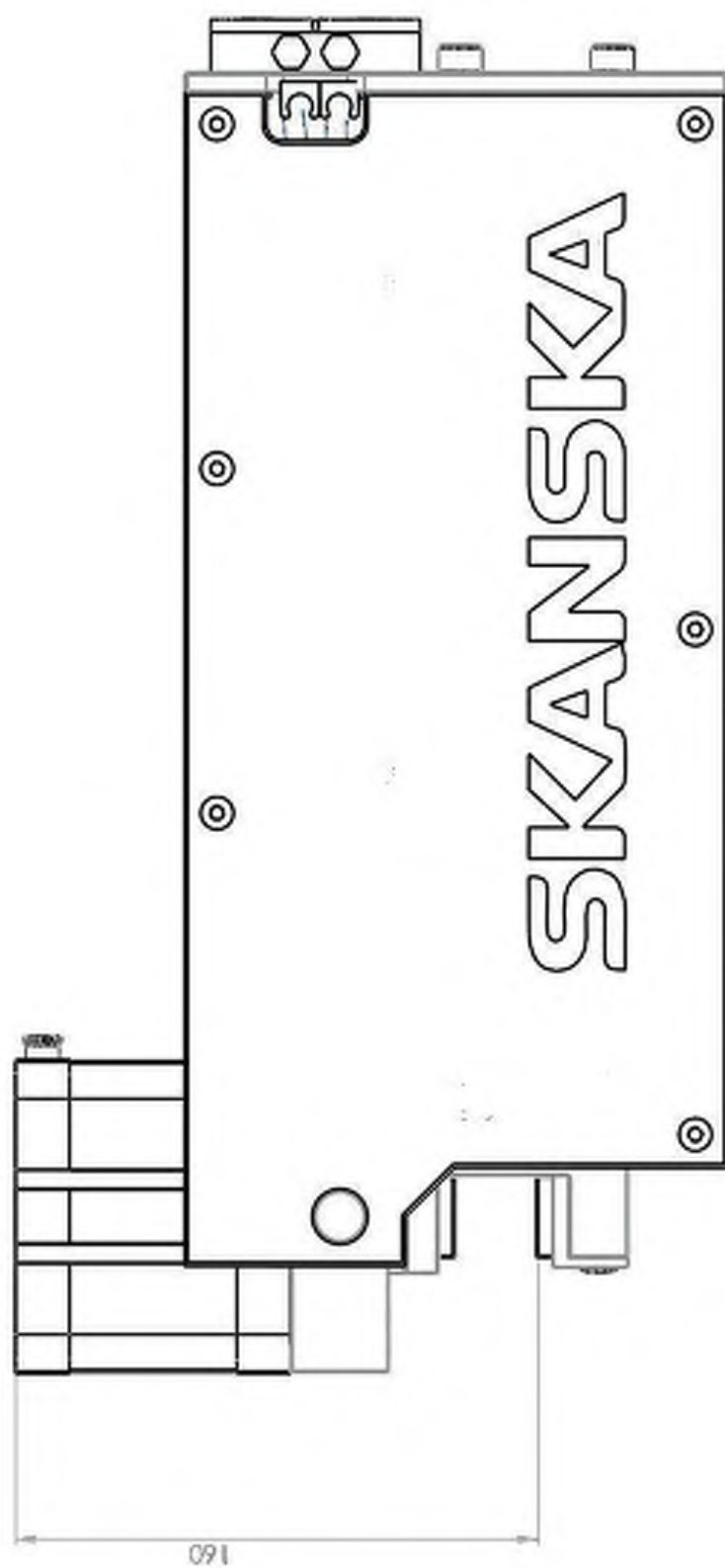
Figur 98 - Komplet simulering av höljet baksida

BILAGA 11 – RELEVANTA ÖVERSIKTLIGA MÅTT

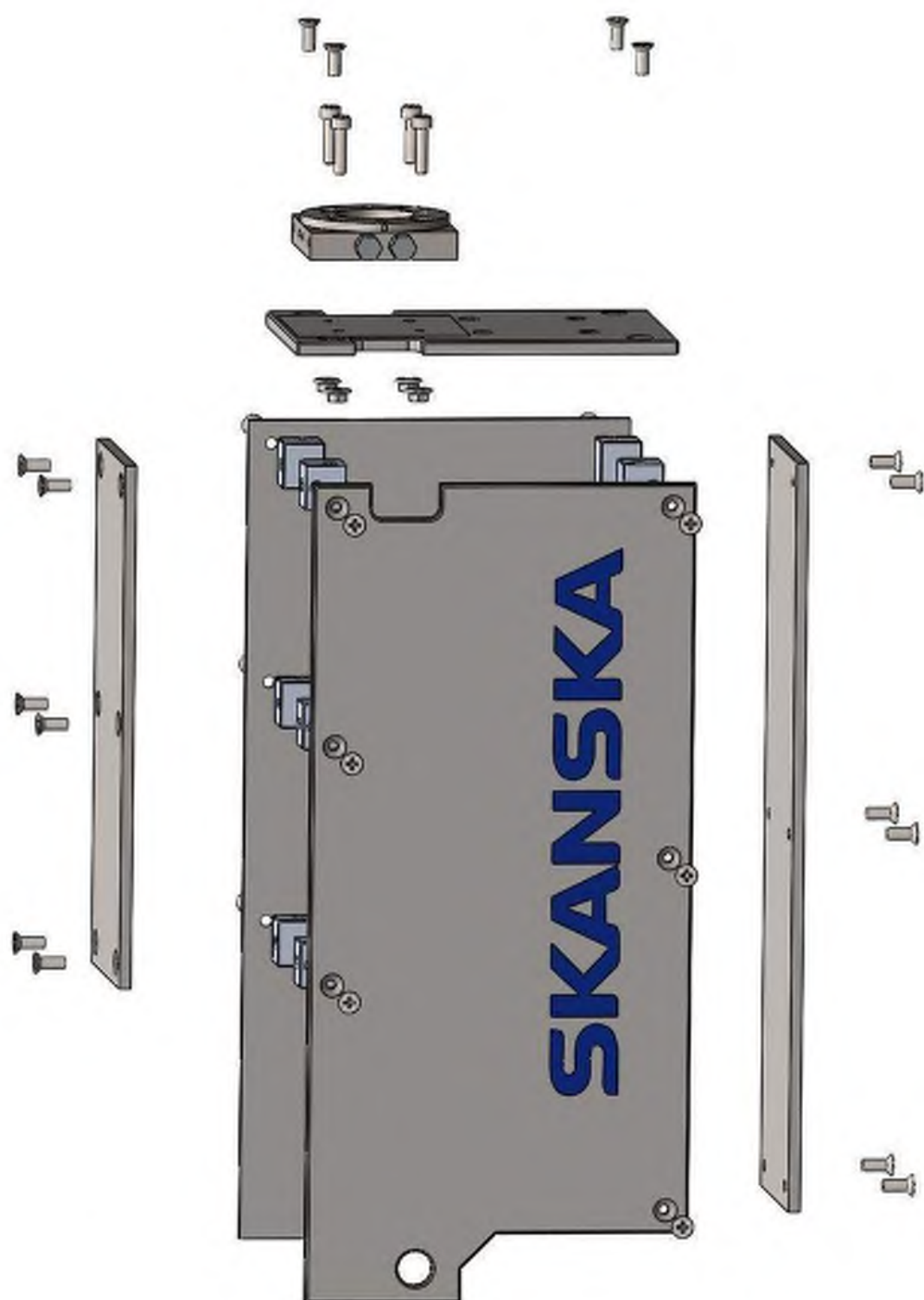
Relevanta mått i ursprungsläge



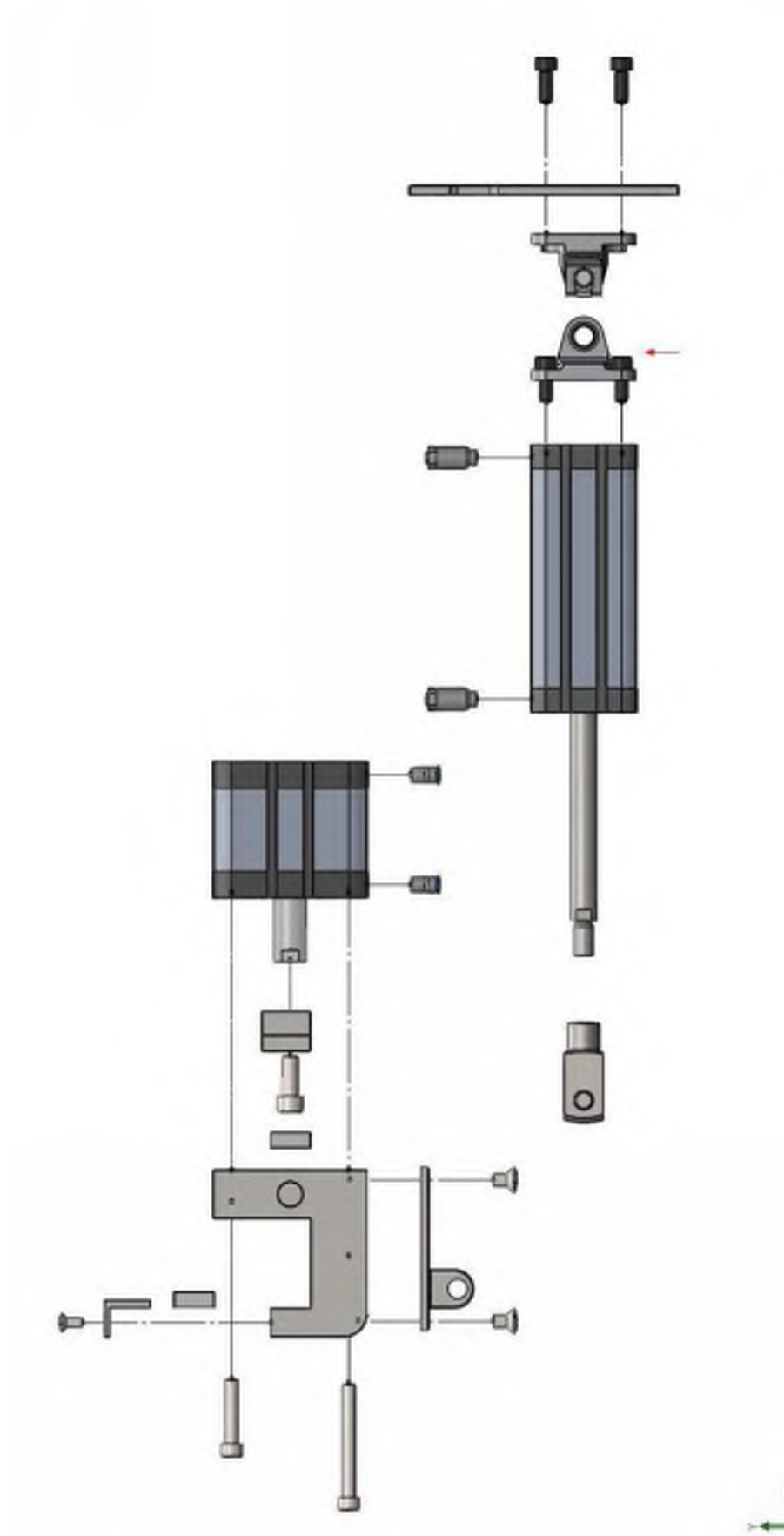
Relevanta mått i roterat läge



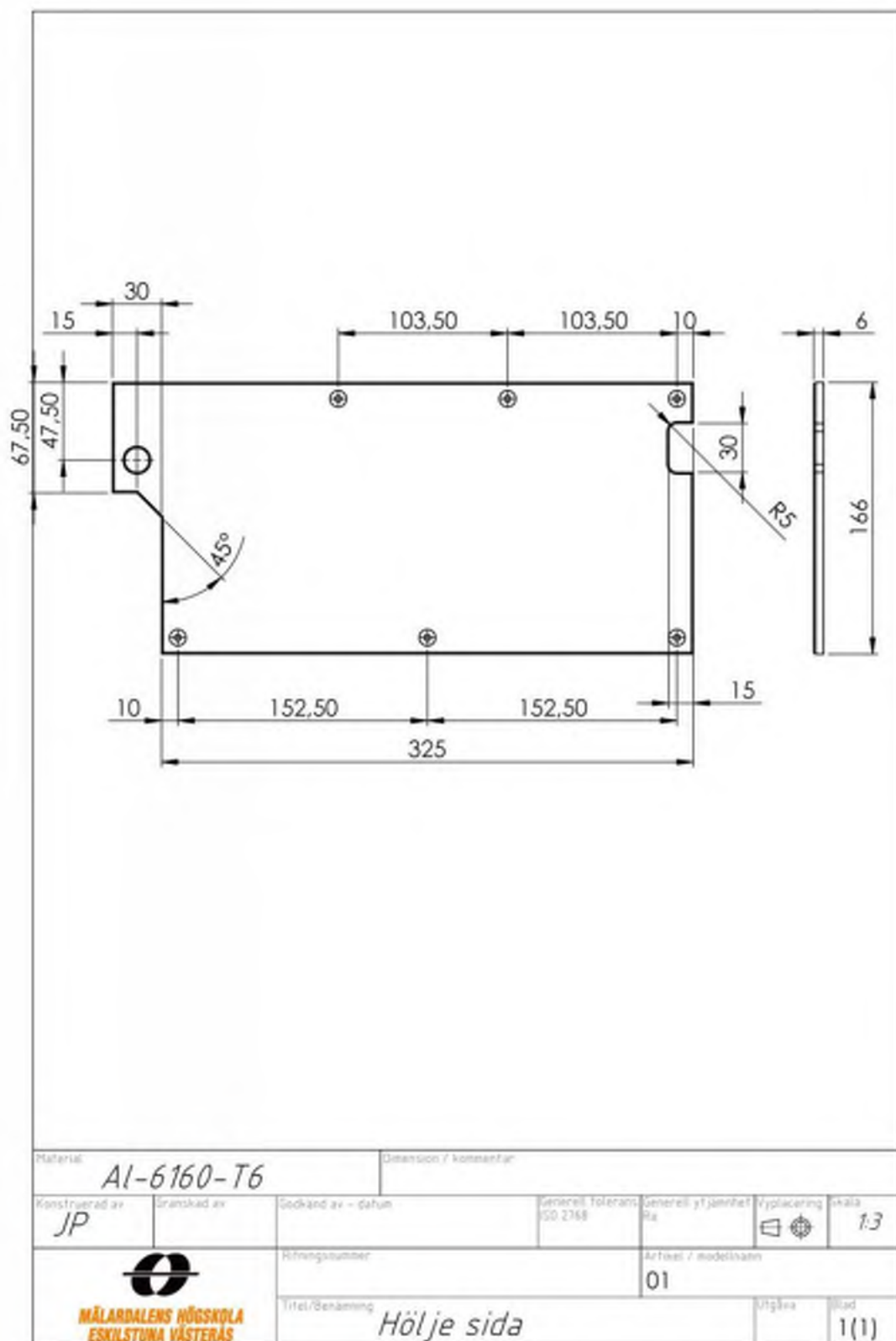
Sprängskiss, hölje



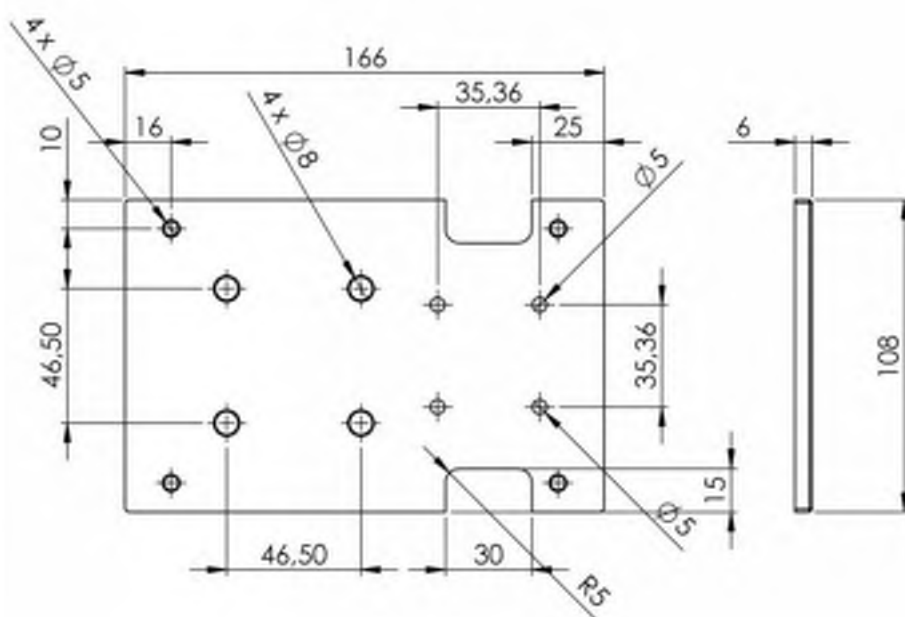
Sprängskiss, cylindrar



Ritning, höljets sida

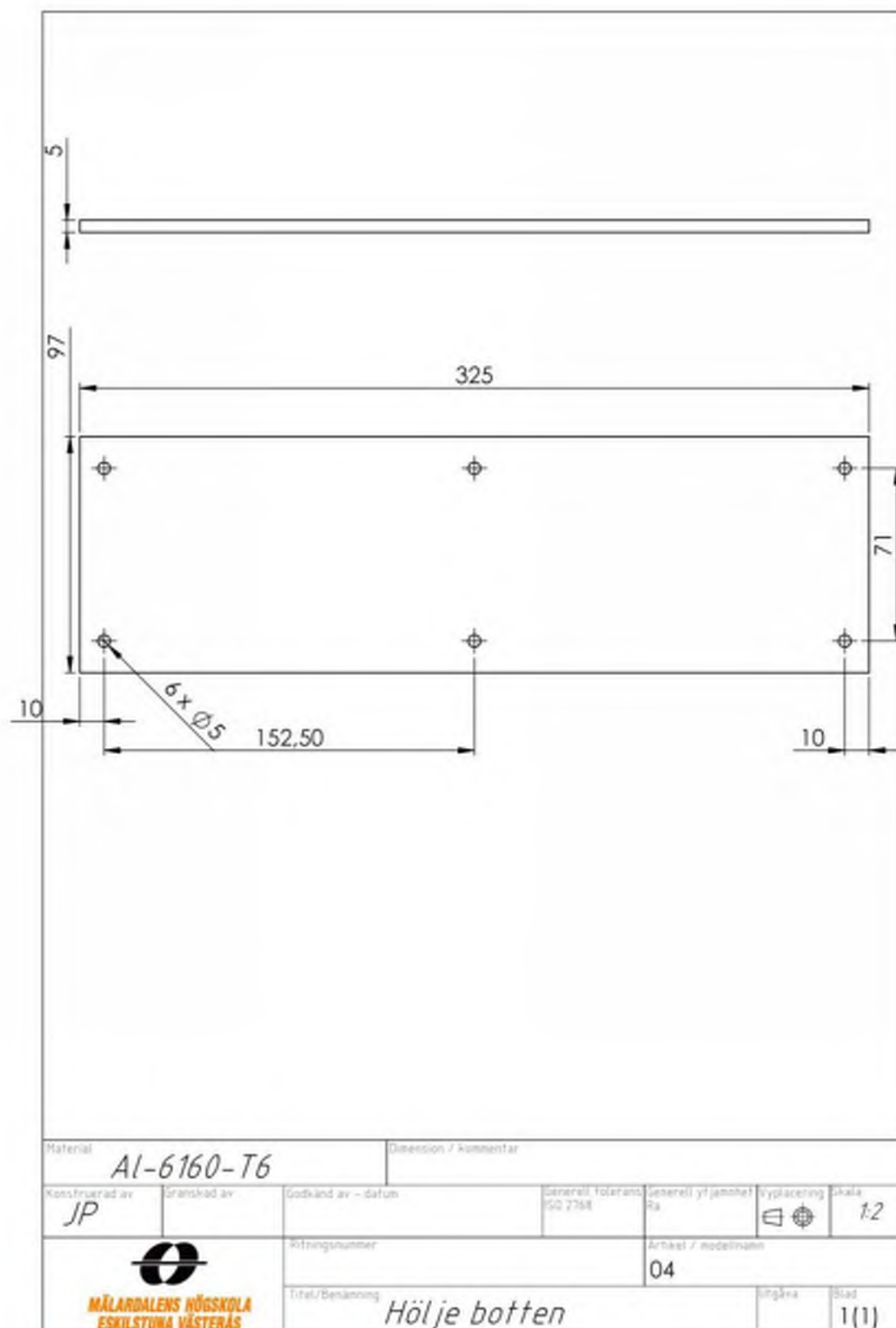


Ritning, höljets baksida

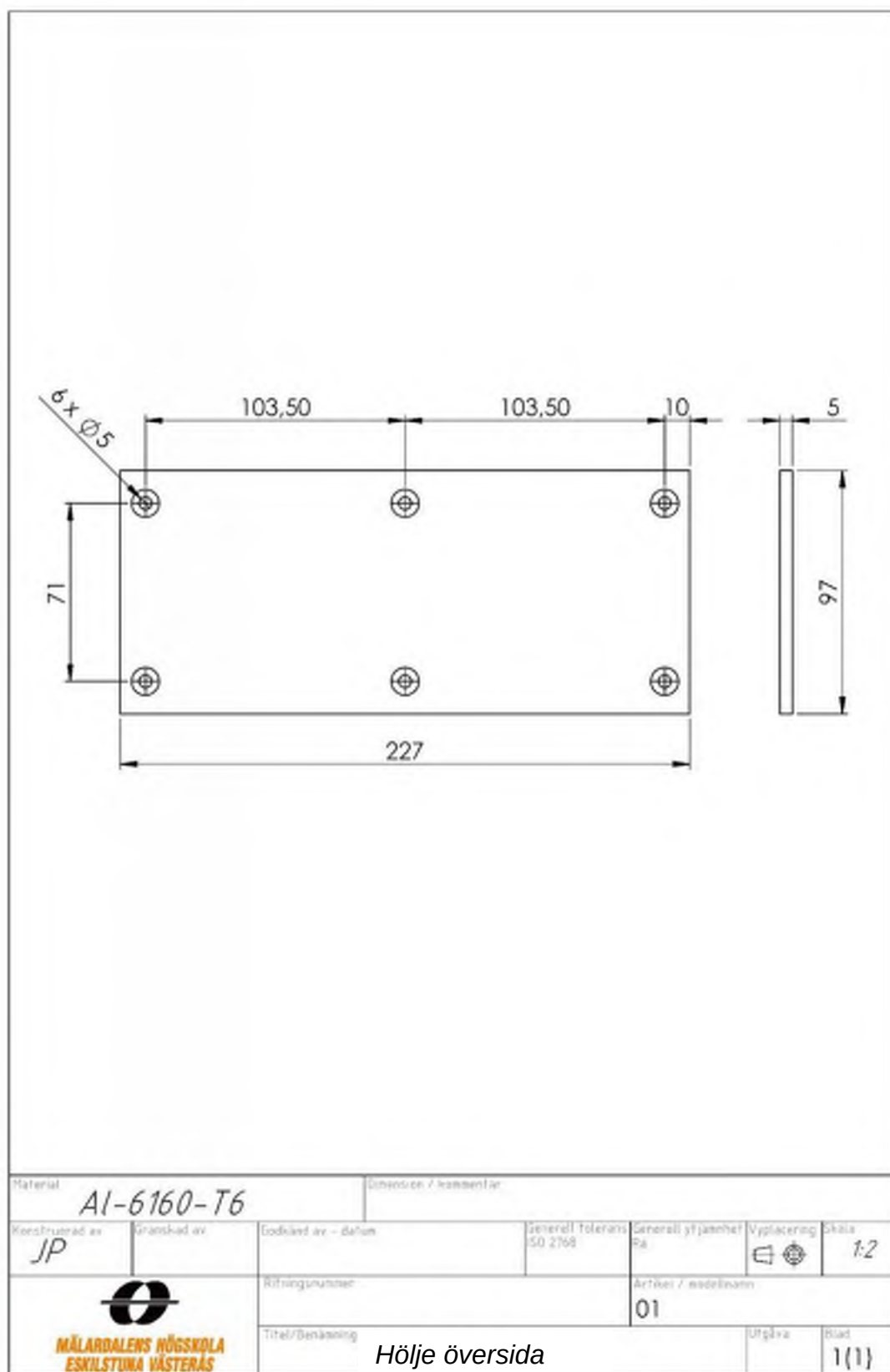


Material <i>Al-6160-T6</i>		Dimension / kommentar				
Konstruerad av <i>JP</i>	Granskad av	Godkänd av – datum	Generell Tolerans ISO 2768	Generell ytjämnhet Ra	Vyplacering 	Skala <i>1:2</i>
 MÄLARDALENS HÖGSKOLA ESKILSTUNA VÄSTERGÅRDS		Witningspunkter			Artikel / modellnamn <i>03</i>	
		Titel/Benämning <i>Hölje bak</i>			Utgåva	Blad <i>1 (1)</i>

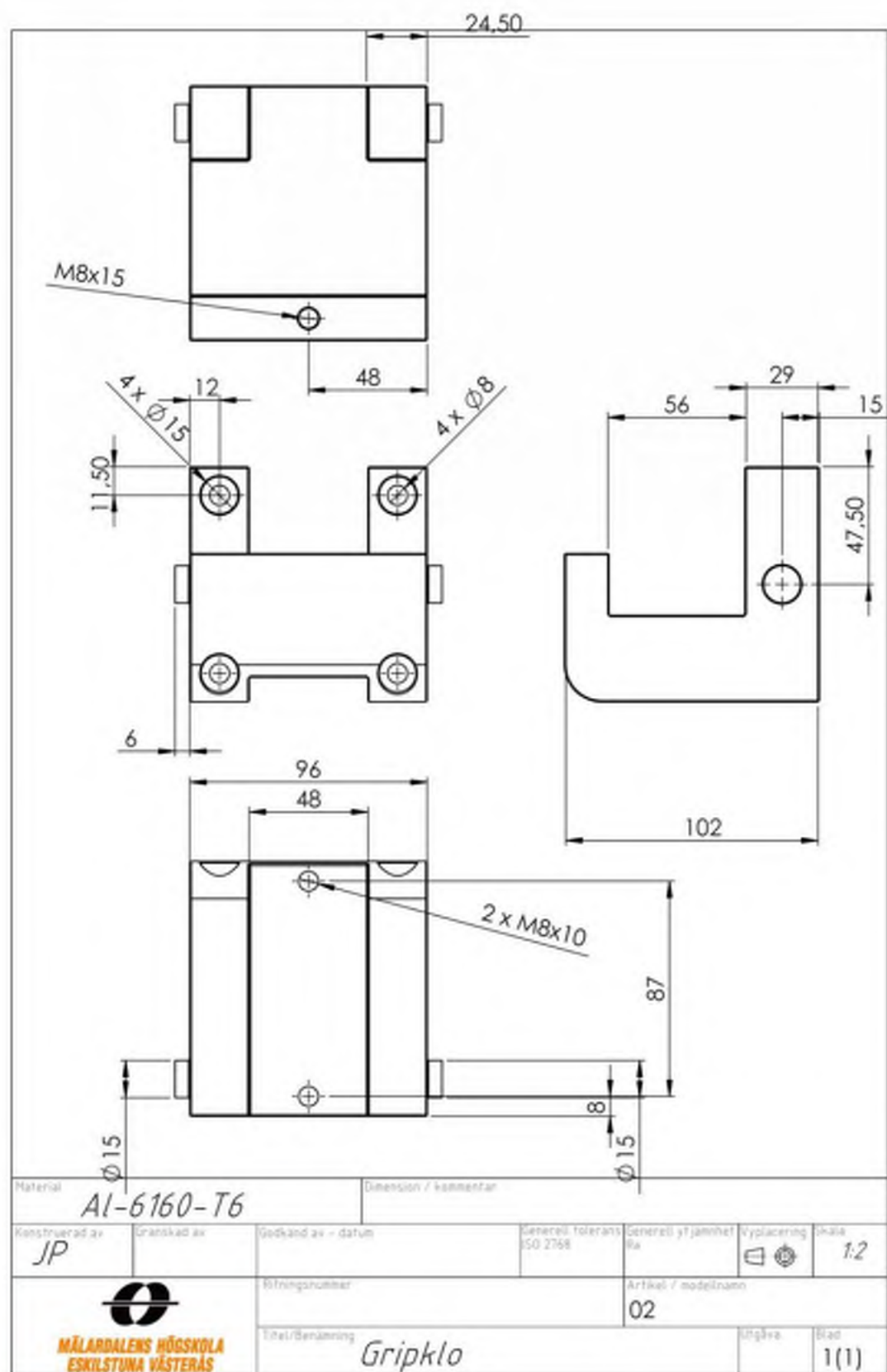
Ritning, höljets undersida



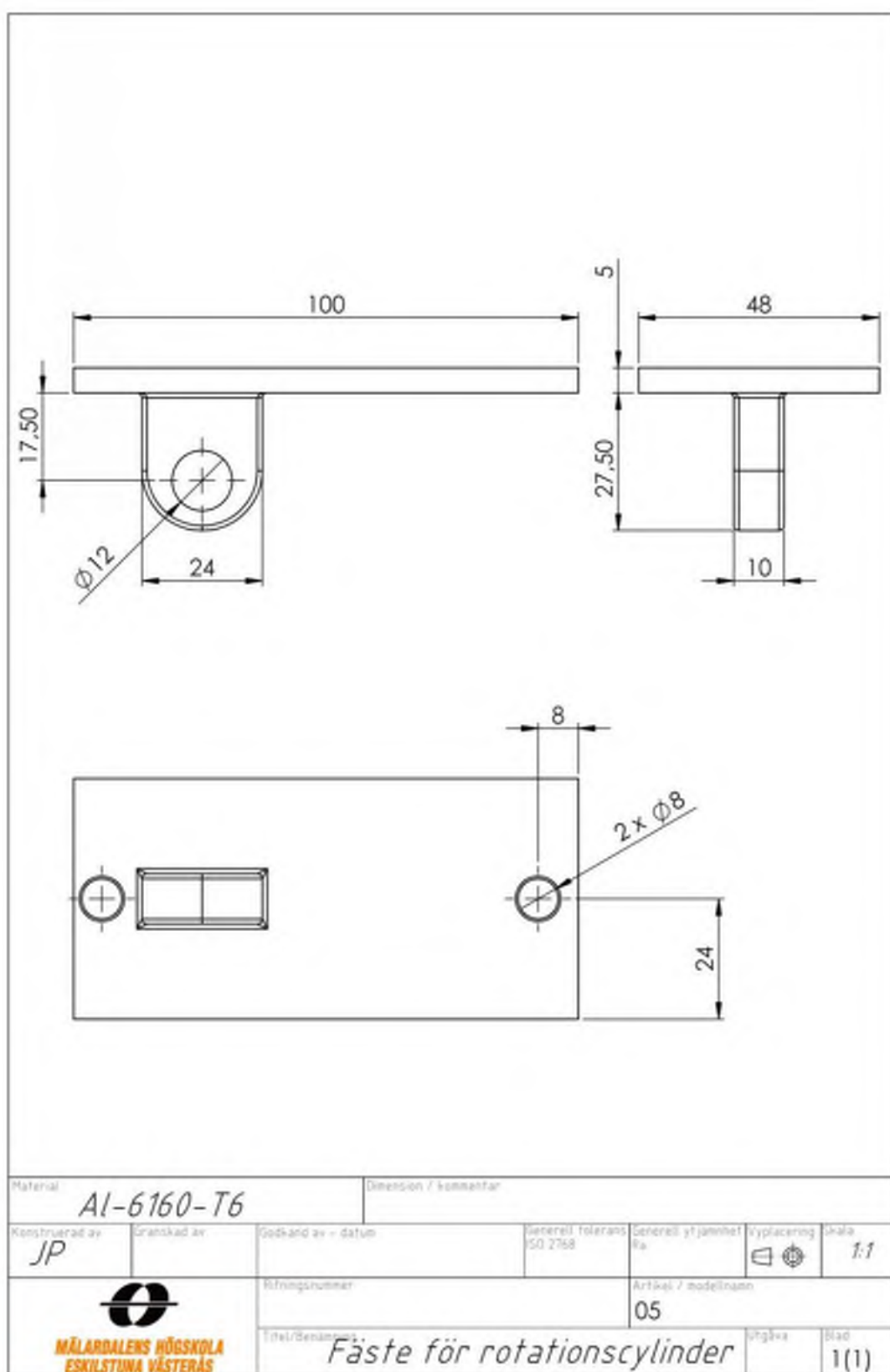
Ritning, höljets översida



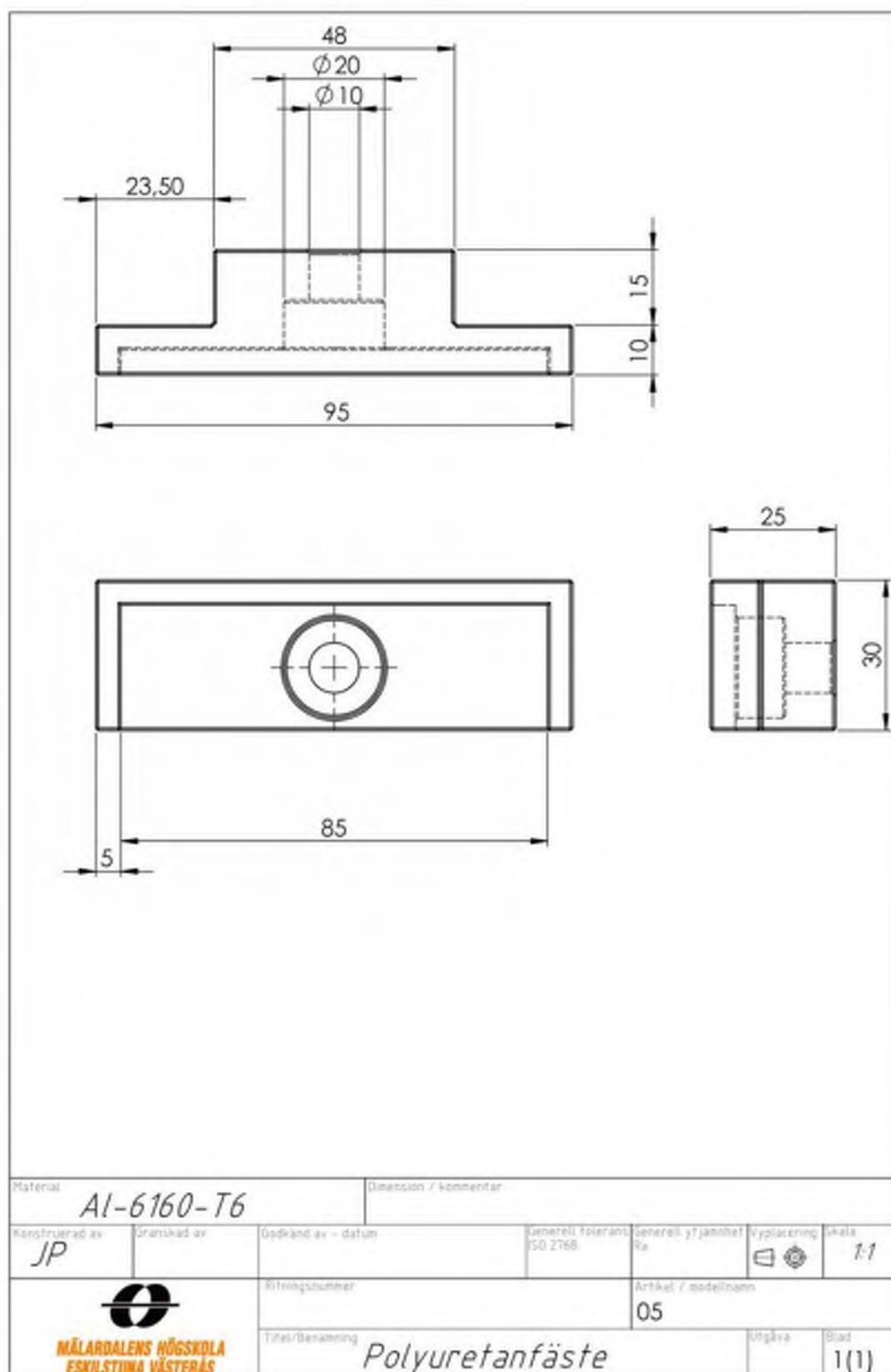
Ritning, Gripklo



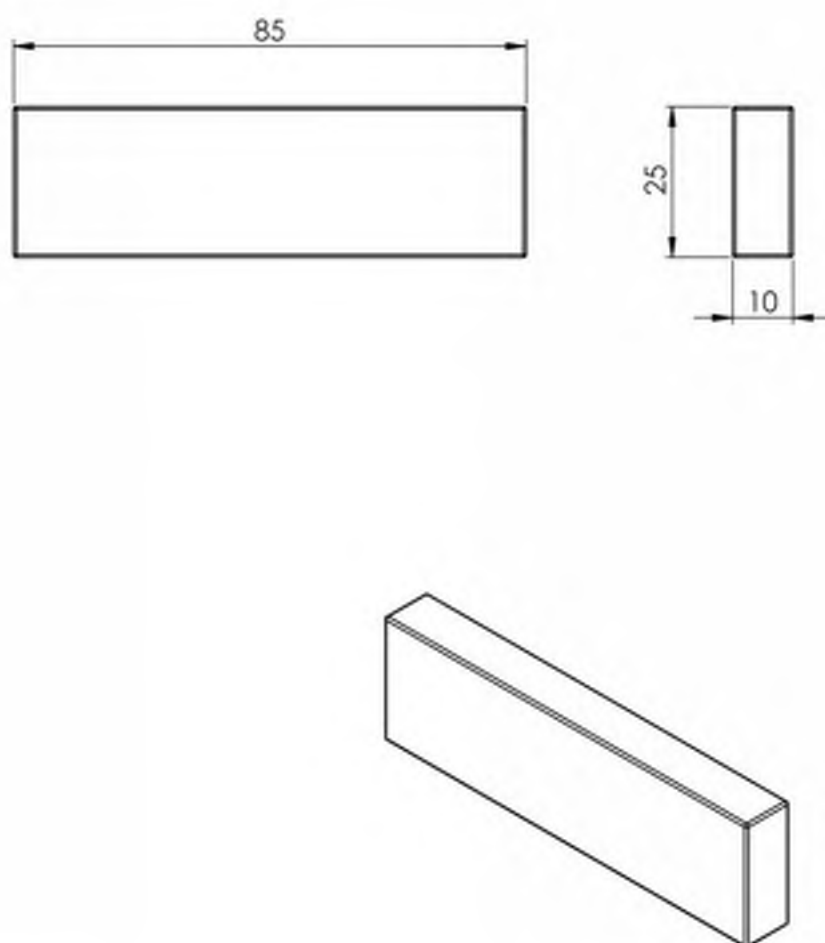
Ritning, fäste för kolvgaffel



Ritning, Polyuretanfäste

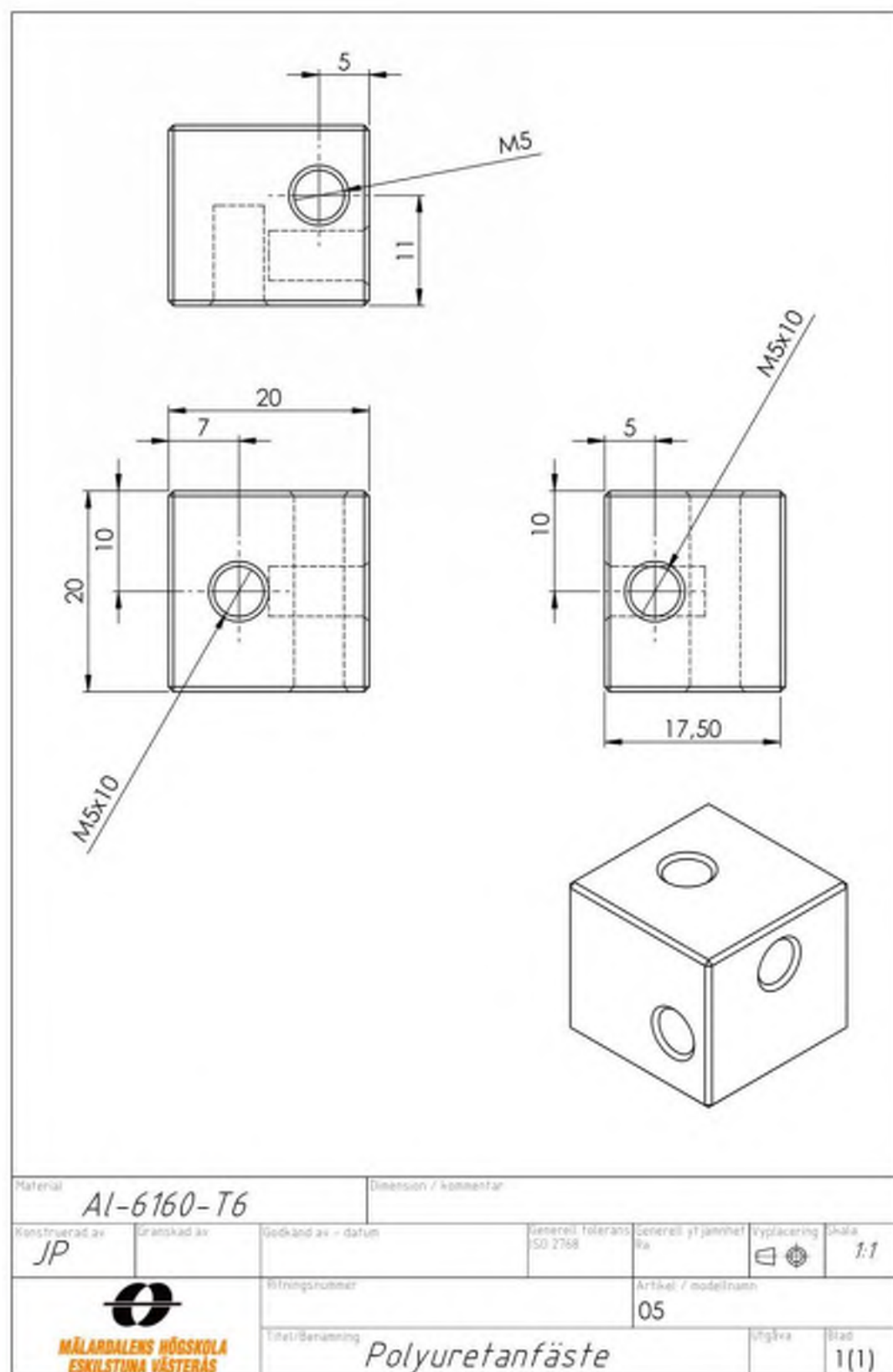


Ritning, Polyuretan



Material <i>PUR</i>		Dimension / kommentar					
Konstruerad av <i>JP</i>	Granskad av	Godkänd av - datum	Generell tolerans ISO 2768	Generell yf jämnhet Ra	Vyplacering 	Skala <i>1:1</i>	
 MÄLARDALENS HÖGSKOLA ESKILSTUNA VÄSTERÅS		Ritningsnummer		Artikel / modellnamn 05			
		Titel/Beskrivning <i>Polyuretanstav</i>				Utgåva	Stad 1(1)

Ritning, Höljefäste



Utveckling av monteringsbar Automationsstation

-Produktrealisering av automatiseringsprocess inom byggindustrin

Examensarbete
Avancerad nivå, 30

KPP502 Produkt- och processutveckling

Philip Bengtsson

Rapport nr: 3
Presentationsdatum: 2018-06-01
Handledare, företag: Anders Thunell
Handledare, Mälardalens högskola: Janne Carlsson
Examinator: Sten Grahn

ABSTRACT

Automated processes in the construction industry are made today by prefabricating the building items and then transport it to the building site. Instead of producing the building items and transport them to the building site there is an idea of bringing the automated process to the construction site is, as it would generate huge profits by reducing unnecessary resource waste. However, it is a difficult challenge to implement and therefore it has not got a big impact today.

The standard method to build reinforcement cages today is a tiresome job for construction workers. The method to build this cages is by means of lashing reinforcements bar on sight or in be prefabricated in advance. To avoid this manual work on sight, an idea from the companies Skanska and Robotdalen is to build an automated facility that can perform this work. This idea based on today's technology can be a way to automate a process at the construction site.

The objective of this facility is to enable this station to be able to be mounted and transportable. This work is based on investigating via a pre-study, how it would be possible to product realize this concept of mountable automation station for reinforcement cages. The problem that arises is that an automation station requires repeatable accuracy and very fine accuracy. That is, the automation system used to drive the station can find itself back to exactly the same position repeatedly. This places enormous demands on the design that it has to be extremely rigid in order not to be deformed.

A smaller prototype of this automated station has shown that the concept works. This work is based on continuing the concept of this project and examining how a full-scale prototype of the construction can look as well as concepts for manufacturing and find solutions for possible design problems.

To study this, the strategy for research been to carry out a case study for the development of this construction. The study has followed a product development model similar to the waterfall method. This means that the work has followed a step by step plan. Many steps and concepts along the way have been evaluated with interviews and with many experienced designers in the industry. Many design areas have been very special and specific, which means it has been difficult to find general data in those areas. This means that a lot of the conclusions have to been put together from the experienced interviewees.

The end result of this work is a product realized model of the automation station. The model is in the form of a gantry. The gantry can be assembled into removable beams that can be placed in a 40 foot container.

The conclusion of this work is that, although the concept of the design has been discussed with several parties there still remains some practical testing. The unevenness system for recurring accuracy remains to be seen if it works. The calculations that are made should also be double-check aw well complete with calculations that may not be done in this work but are required to realize the concept. Even though there needs some testing, the concept is still considered feasible. This means that it could be a possible application to automate an on-site construction process.

SAMMANFATTNING

Automatiserade processer inom bygg industrin görs idag via att prefabricera byggämnena och skickas till byggplatsen i efterhand. Tanken om att föra den automatiska processen till byggarbetsplatsen finns då det skulle ge stor vinning genom att minska onödigt resurs slöseri. Dock är det en svår utmaning att genomföra och därför har det inte fått stort genomslag i dagsläget.

Den standardiserade metoden för att bygga armeringskorgar idag är ett slitsamt arbete för bygg arbetare. Metoden går idag ut på att naja ihop korgar med hjälp av ett najverktyg eller förhand. För att undvika detta manuella arbete finns en idé från Skanska och Robotdalen att bygga en automatiserad anläggning som kan utföra detta arbete. Denna idé baserad på dagens teknik kan vara ett sätt automatisera en process på byggplatsen.

Projektmålet med denna anläggning är att kunna göra denna anläggning monterbar och fraktbar. Detta arbete bygger på att undersöka via en förstudie hur det skulle gå att göra för att produktrealisera detta koncept av monteringsbara automationsstation för armeringskorgar. Problemet som uppstår är att en automations station kräver repeterbar noggrannhet. Det vill säga att automationssystemet som används för att driva stationen kan hitta tillbaka till exakt samma plats som ursprungsläget. Detta ställer ett enormt stort krav på konstruktionen att den måste vara enormt styv för att klara att inte deformeras.

En mindre prototyp på denna konstruktion har visat att konceptet fungerar. Det här arbetet bygge på att ta vidare det konceptet i detta projekt och undersöka hur en fullskalig prototyp av konstruktion kan se ut samt koncept för tillverkning samt lösningar för eventuella konstruktions problem.

För att studera detta har undersökningen har strategin för forskningen varit att utföra en fallstudie för utvecklandet av denna konstruktion. Studien har följt en produktutvecklingsmodell som liknar vattenfallsmetoden. Detta innebär att arbetet har följt en steg för steg plan. Många steg och koncept på vägen har utvärderats med intervjuer med många erfarna konstruktörer inom branschen. Många konstruktionsområden har varit väldigt specialiserade vilket innebär att det har varit svårt att hitta generell information inom området utan mycket har gått ifrån erfarenhet från de intervjuade.

Slutresultatet av detta arbete är en produktrealiserad modell av automationsstationen. Modellen är i form av en gantry. Gantry:n kan monteras ihop i löstagbara balkar som kan läggas i en 40 fots-container.

Slutsatsen av detta arbete är att även om koncepten för konstruktionsdelarna har diskuterats med flera parter består en del att testa. Systemet för att ta upp ojämnheter för att få till repeterbar noggrannhet återstår att se om det fungerar. Det bör även dubbelkollas beräkningar samt komplettera de beräkningar som fattas. Utöver det som ska testas ses ändå konceptet ut att vara genomförbart. Detta innebär att det kan vara ett en möjlig applikation att automatisera en byggprocess på plats.

FÖRORD

Detta är ett examensarbete på Civilingenjörsnivå inom kursen PPU502. Arbetet har riktat sig in inom konstruktion och omfattar 30 hp. Arbetet har utfärdats utav Philip Bengtsson som går sista året inom Civilingenjörsutbildning Produkt- och processutveckling på Mälardalens högskola under hösten 2017 och våren 2018.

Arbetet har involverat flera konstruktionsområden som har varit helt nya samt så har det varit tvunget att tillämpas ett nytt tankesätt för att lösa många av problemen. Det har varit en givande upplevelse med många parter som har varit involverade.

Därmed vill jag tacka de som har varit med och bidragit till detta arbete. Första och främst De inblandade från Robotdalen som gav möjlighet att introducera detta arbete och varit med hela vägen som stöd. Utan innebördes ordning tack till Ingemar Reyer, Anders Thunell, Johan Relefors, Erik Hellström och Hugo Andersson. Samt även Philip Holst som har bidragit med feedback för konstruktionen.

Jag vill även passa på att tacka konstruktionsgänget från Andon Robotics som tålmodigt har tagit tid för att diskutera arbetet genom muntlig intervju samt mejl. Det har varit många frågor på vägens gång och ni har lyckats täcka alla de mejl jag skickade under arbetet.

Tack även till min Handledare på från Mälardalens Högskola Janne Carlsson samt övriga som har varit med under arbetet såsom EQpack, SKF, IMS Maskinteknik.

Philip Bengtsson, 2018

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1. RAPPORTENS DISSOPSITION	13
2. INLEDNING	14
2.1. BAKGRUND.....	14
2.2. PROBLEMFORMULERING	18
2.3. SYFTE OCH FRÅGESTÄLLNINGAR.....	20
2.4. PROJEKTETS RIKTLINJER	21
2.5. AVGRÄNSNINGAR	21
2.6. MÅL	22
3. ANSATS OCH METOD	24
3.1. METODIK	24
3.2. PRODUKTUTVECKLINGSMETODIK	25
3.2.1. PROJEKTPLANERING.....	26
3.2.2. PROBLEMFÖRSTÅELSE	26
3.2.3. KONCEPTGENERERING	27
3.2.4. KONCEPTUTVÄRDERING	27
3.2.5. PRODUKTREALISERING	27
3.2.6. PRODUKTUTVÄRDERING	28
3.3. DATAINSAMLING.....	28
3.3.1. INTERVJUER.....	29
3.3.2. TEKNISKT DATAUNDERLAG	29
3.3.3. LITTERATURSTUDIE	30
3.3.4. OMVÄRLDSANALYS	30
3.4. KVALITETSSÄKRING	30
3.4.1. PRIMÄRA OCH SEKUNDÄRA KÄLLOR	31
3.4.2. RELIABILITET OCH VALIDERING AV INFORMATION	31
4. TEORETISK REFERENS RAM	32
4.1. PRODUKTUTVECKLINGS VERKTYG	32
4.1.1. FUNKTIONSANALYS	32
4.1.1. KRAVSPECIFIKATION	32
4.1.2. DFX.....	33
4.1.3. DFA.....	33
4.1.4. DFM.....	33
4.2. ROBOTSYSTEMET	34
4.2.1. INDUSTRIROBOT IRB-4600.....	34
4.2.2. DRIVSYSTEM	34
4.2.3. ROBOTSYSTEM INOM BYGGINDUSTRI	34
4.2.4. MOBILE FACTORY	34
4.3. PRECISIONSGRAD FÖR CNC-MASKINER	35
4.4. TOTALSTATION OCH TRACKER	36
4.5. NAJNING OCH TILLVERKNING AV ARMERINGSKORGAR.....	36
4.6. HÅLLFASTHET	37
4.6.1. MATERIALEGENSKAPER.....	37
4.6.2. GEOMETRISK UTFORMNING	37
4.6.3. FEM-ANALYSER.....	38
5. TILLÄMPAD LÖSNINGSMETODIK.....	39
5.1. PROJEKTPLANERING.....	39
5.2. PROBLEMFÖRSTÅELSE	39
5.2.1. INTERVJUER.....	39
5.2.2. OMVÄRLDSANALYS	39
5.2.3. MARKNADSKRAV	40
5.2.4. FUNKTIONSANALYS	40
5.2.5. KRAVSPECIFIKATION	41
5.2.6. PRECISIONSGRAD	42

5.2.7.	KONSTRUKTIONSUPPDELNING	43
5.3.	KONCEPTGENERERING	44
5.3.1.	ROBOTSYSYSTEM	44
5.3.2.	ÖVERGRIPANDE KRANSYSTEM	45
5.3.3.	STYRNING	47
5.3.4.	FOGAR, MONTERINGSMÖJLIGHETER OCH FÖRBAND	48
5.3.5.	DRIVNING	50
5.3.6.	INPASSNING OCH INSTYRNING	51
5.3.7.	INMÄTNING	53
5.3.8.	KABELDRAGNING	54
5.3.9.	SPECIAL MONTERING	56
5.4.	KONCEPTUTVECKLING:	59
5.4.1.	VAL AV KRANBALKSSYSTEM	59
5.4.2.	VAL AV STYRNING	62
5.4.3.	VAL AV IHOPFOGNING	63
5.4.4.	VAL AV DRIVNING	63
5.4.5.	VAL AV INPASSNING	64
5.4.6.	VAL AV MITTENSARV	64
5.4.7.	VAL AV UPPTAGNING AV FEL	64
5.5.	PRODUKTREALISERING	65
5.5.1.	TILLVERKNING	65
5.5.2.	KABELDRAGNING	66
5.5.3.	TÄLTHALL	66
5.5.4.	FRAKT	66
6.	RESULTAT	68
6.1.	SLUTKONCEPT	68
6.1.1.	UPPDELENING AV DELAR:	69
6.1.2.	MONTERING AV KONSTRUKTIONEN	69
6.2.	VAL AV KOMPONENTER	74
6.2.1.	LINJÄR STYRNINGAR	74
6.2.2.	DRIVNING OCH VÄXELLÅDA	74
6.3.	INPASSNING	74
6.4.	SLUTGILTIGA DIMENSIONER FÖR KONSTRUKTIONEN BLEV:	77
6.5.	FRAKT	77
6.6.	SLUTRESULTAT MOT MÅL	78
7.	ANALYS OCH DISKUSSION	80
7.1.	UTVÄRDERING AV RESULTAT OCH FALLSTUDIE	80
7.1.1.	PRODUKTUTVÄRDERING – ANALYS MOT KRAVSPECIFIKATION	80
7.1.2.	ÖVRIGA FRÅGOR SOM STUDIEN BESVARAR	82
7.2.	UTVÄRDERING MOT AVGRÄNSNINGARNA OCH RESURSKRAVEN	83
7.3.	UTVÄRDERING AV ARBETSMETOD OCH TROVÄRDIGHET I STUDIE	84
7.3.1.	REPETERBARHET AV STUDIE	84
7.3.2.	INTERVJU OCH AVSTÄMNING SOM VERIFIKATION FÖR RESULTAT.	85
7.4.	ANALYS MOT PROBLEM OCH FRÅGESTÄLLNING	85
8.	SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER	87
9.	KÄLLFÖRTECKNING	90
10.	BILAGOR	92

FIGURFÖRTECKNING

Figur 1. Koncept för automationsstation	15
Figur 2. Bygge av armeringskorg	15
Figur 3. Färdigställd armeringskorg som lyfts iväg av lyftkran	16
Figur 4 - Produktutvecklingsprocessen presenterad av Ullman (Ullman, 2010)	25
Figur 5 – Funktionsträd: En schematisk bild på hur en funktionsanalys kan se ut (Bark, 2009)	32
Figur 6 - Robotmodell: IRB 4600 (ABB, 2008)	34
Figur 7. Armeringskorg (Celsa-group).....	36
Figur 8. Najningspunkter vid en armeringsskorg (Spiksäkert, 2010)	36
Figur 9 – Sträckkurva (Viecke, 2003).	37
Figur 10 - Optimal utformning för vanliga lastfall (Carlsson J. , 2015)	38
Figur 11. Gantry-system (AZoRobotics, 2018).....	45
Figur 12. Portalkonstruktion (Andon Robotics, 2018)	45
Figur 13 - Koncept 1 - Gantry	46
Figur 14 - Koncept 2 - portal.....	46
Figur 15 - koncept 1 - styrning för kättigtelfer (PMH, u.d.)	47
Figur 16 – Koncept 9: linjär styrning (SKF, u.d.)	47
Figur 17 - Koncept 3: Bearbetad räls med kamrullar och löphjul	48
Figur 18 - Koncept 1 ihopfogning	49
Figur 19 - Koncept 2 ihopfogning	49
Figur 20 – kuggståndsdrift (Engineering360, u.d.)	50
Figur 21 – kulskruv (Araton AB, u.d.)	50
Figur 22 - instyrning 1.1	51
Figur 23 - Instyrning 1	52
Figur 24 - Instyrning 2.1	52
Figur 25 - Instyrning 2.2	53
Figur 26 - Instyrning 2.3	53
Figur 27 - Instyrning 2.4	53
Figur 28 - Kabeldragning	55
Figur 29 - Mitten skrav	56
Figur 30 - Mittenskarv 2	57
Figur 31 - Mittenskarv 3	57
Figur 32 - Mittenskarv 4	58
Figur 33. Deformation från en kalibrerings process från modellen 1	60
Figur 34 Deformation från en kalibrerings process från modellen 2	60
Figur 35. Tillverkning av balk 1	65
Figur 36. Tillverkning av balk 2	65
Figur 37. Slutresultat av gantry:n	68
Figur 38. Benämning av delar	69
Figur 39. Resultat - Pelares position	70
Figur 40. Resultat montering av bärande balkar	70
Figur 41. Resultat - Robotbalkens vaggors position	71
Figur 42. Resultat - System för att ta upp parallellitetsfel	71
Figur 43. Resultat – Fogning	71
Figur 44. Resultat - Montering av robotbalk bild 1	72
Figur 45. resultat montering av robotbalk bild 2	72
Figur 46. Resultat - Montering av Z-led 1	73
Figur 47. Resultat - Montering av Z-led 2	73
Figur 48. Resultat - Montering av övriga detaljer	73

Figur 49. Resultat - Färdig montering	74
Figur 50. Resultat - Inpassning 1 mot robotbalk	75
Figur 51. Resultat - Inpassning 2 i skarv mot för z-led bild 1.....	75
Figur 52 Resultat Inpassning 2 i skarv mot för z-led bild 2.....	75
Figur 53 Resultat Inpassning 2 i skarv mot för z-led bild 3.....	76
Figur 54. Resultat - Inpassning 3.....	76
Figur 55. Resultat - Frakt 1	77
Figur 56. Resultat - Frakt 2	77

TABELLFÖRTECKNING

Tabell 1 - Rapportens disposition.....	13
Tabell 2 - Marknadskrav	40
Tabell 3 - Kravspecifikation.....	41
Tabell 4 - Data för armeringsstål (Begroup, 2012)	44
Tabell 5: Jämförelsematrix över koncept 1 och 2	61
Tabell 6. Frakttabell 1	67
Tabell 7. Frakttabell 2	67
Tabell 8. Uppnådd kravspec.	80

Ordlista och förkortningar:

Naja:	Knyta ihop knutpunkter av armeringsjärn med ståltråd.
CAD:	Computer Aided Design.
E-modul:	Elasticitets modul.
Rational:	Engelskt uttryck för ”logiskt grundat” och ”förståndsmässig”, Används för att beskriva underlag för beslut.
Löphjul:	Rulle som löper ovanpå en räls.
Kamrulle:	Lager rullar som används för åkbanor.
Ställskruv:	Justerbarskruv som visar en skala för hur mycket skruven dras åt.
Gantry:	Variant av kranbalkssystem.
Totalstation:	Även benämnt teodolit eller tracker, Ett elektroniskt mätinstrument för läng och avstånd.
Fläns:	Tunn skiva som löper längs med eller runt en detalj. Används ofta som fästytor vid fogar.
Plana:	Bearbeta en yta på en detalj så att den blir plan. T.ex genom att använda ett fräsverktyg.
Lastbehållare:	Exempelvis en 40-fots container.

1. RAPPORTENS DISSOPSITION

Detta kapitel visar hur rapportens struktur är uppdelad över projektet och kort sammanfattar varje kapitels innehåll. Se tabell 1 nedan.

Tabell 1 - Rapportens disposition

Kapitel	Innehåll
Kapitel 2 Inledning	Detta kapitel beskriver projektets bakgrund samt tar upp fokusområde för problem, mål och syfte med arbetet.
Kapitel 3 Ansats och metod	Kapitlet beskriver metodiken för hur arbetet har utförts för att genomföra projektet.
Kapitel 4 Teoretisk referensram	Avsnittet tar upp den teorin som är kopplat till projektet och som slutligen ligger till stor grund för arbetet.
Kapitel 5 Tillämpad lösningsmetodik	Beskriver hur metodiken tillämpades i praktiken.
Kapitel 6 Resultat	Redovisar resultatet för arbetet.
Kapitel 7 Analys	Berör analys av resultatet och hur arbetsmetoden påverkade resultatet samt hur väl resultatet kopplar till forskningsfrågorna som ställdes i början.
Kapitel 8 Slutsats och rekommendationer	Presenterar en slutsats för resultatet och arbetet i sin helhet. Tar även upp vidare rekommendationer för arbetets.
Kapitel 9 Källförteckning	Källor och uppgifter som har använts för projektet.
Kapitel 10 Bilagor	Tillkommande bilagor som en stor del av arbetet bygger på.

2. INLEDNING

Detta kapitel beskriver projektets bakgrund samt riktlinjer för projektet. Det presenteras även vilka problem som ska fokuseras på i det här arbetet, Vilka frågeställningar som är intressanta för projektet samt syfte och målsättning med detta arbete.

2.1. Bakgrund

Inom byggbranschen idag produceras många konstruktioner på plats och görs ofta med ett manuellt arbete. Exempelvis stora segment till större byggnader. Alternativt till detta går det att producera dessa byggsegment i en fabrik på ett automatiserat sätt och sedan skicka iväg byggämnena till byggplatsen för att sedan placeras i sitt sammanhang i bygget. Det senare alternativet kallas för att prefabricera. Prefabrikerat har en vinning i att det kan produceras med autonoma system och på så sätt går att producera i ett snabbare tempo som ej heller kräver hårt manuellt arbete. Dock medför denna metod stora logistiska problem och kostnader för byggprocessen. Exempel på problem kan vara väntetider, ej flexibelt till bygget och väldigt resurskrävande för byggprojektet att transportera (Rauch, Dominik, & Dallasega, 2015).

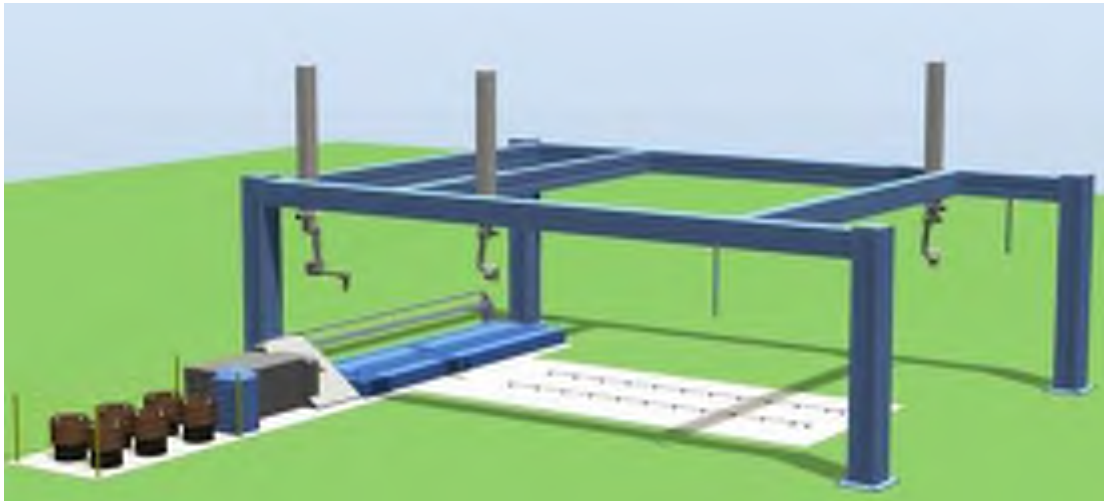
Detta gör att enda alternativet i många fall att bygga byggnadssegment är på plats vid bygget. Det finns tankar och koncept av att använda sig av autonoma produktionssystem vid arbetsplatsen vilket skulle minska många av de logistiska problem som tillkommer vid prefabrikerat men ett sådant produktionssystem skulle innebära att det skulle behöva vara transporterbart och kunna förflytta sig från arbetsplats till arbetsplats. Med andra ord innebär det att förflytta fabriken till arbetsplatsen där det som produceras används direkt. Detta finns det koncept för men då dessa koncept innebär en svår teknisk utmaning har det inte ansetts tillräckligt ekonomiskt hållbart att genomföra en satsning på utveckling för ett autonomt produktionssystem som befinner sig på plats vid byggarbetsplatsen som har fått genomslag ännu. Det har med andra ord inte tillkommit ett koncept för en viss applikation som anses lämplig med dagens teknik ännu (Rauch, Dominik, & Dallasega, 2015). Detta beskrivs närmare i kapitel: 4.2.4 Mobile Factory.

Armerade betongkonstruktioner är idag ett av världens mest använda konstruktionsmaterial. Det används vid bygge av bostäder, broar, tunnlar vägar med mera. Dessa betongkonstruktioner görs i segment där det byggs en armeringskorg först och sedan gjutas betongen kring armeringskorgen. Denna grund av att bygga stora armeringskorgar är idag till stor del ett manuellt arbete som antingen kan göras på plats eller vara prefabricerade (Svenska Betong, 2017) (Robotdalen, 2017).

Skanska är ett bygg och anläggningsföretag som arbetar med samhällsutveckling. De jobbar således i stor utsträckning med armerade betongkonstruktioner och har för avsikt att automatisera processen att bygga armeringskorgar som ligger i grund till betongkonstruktionerna. De har då för avsikt att göra detta vid arbetsplatsen och undvika användning sig av prefabricerade metoder som redan är automatiserade till viss mån. Genom att automatisera processen av armeringskorgsbygge vid arbetsplatsen avser Skanska att minska byggtiden av betongkonstruktioner samt att underlätta tunga montagearbeten och på sådant sätt förbättra arbetsmiljön och öka säkerheten på arbetsplatsen. De kommer även att slippa det enorma resurskrävandet från logistiken som prefabrikerat kräver. Tanken med att automatisera korgbygget innebär att använda sig av industrirobotar som sätter ihop korgen istället för människor. Dock finns det inga industrirobotar som har tillräckligt lång räckvidd för att bygga en stor armeringskorg och därmed är tanken att en åkbanekonstruktion ska hjälpa robotarna att förflytta sig så att de når till alla nödvändiga positioner. Att automatisera processen för att bygga dessa

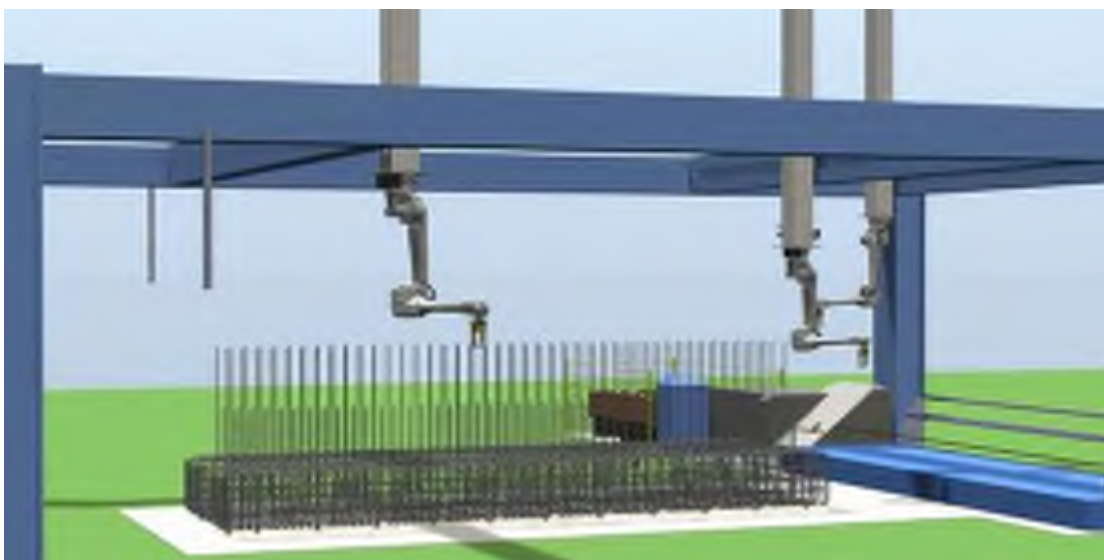
korgar innebär således att bygga en station som med hjälp av industrirobotar fäster armeringsjärn mot varandra och najar ihop dem (Skanska, 2017).

Robotdalen är ett företag som arbetar med nyutvecklande lösningar inom automation. De har inom detta projekt visat en konceptuell tanke på hur denna automatiserade process av att bygga armeringskorgar kan fungera genom att använda sig av ett ramverk som förflyttar robotarna och bygger ihop korgen. Detta ramverk fungerar som en automatiserad station för armeringsbygget. Nedanstående figurer illustrerar hur konceptet för hur denna automationsstation kan tänkas fungera på en konceptuell nivå. Det vill säga att figurerna bara visar en tanke över automationsprocessen men inget som är slutgiltigt för hur det praktiskt ska fungera.



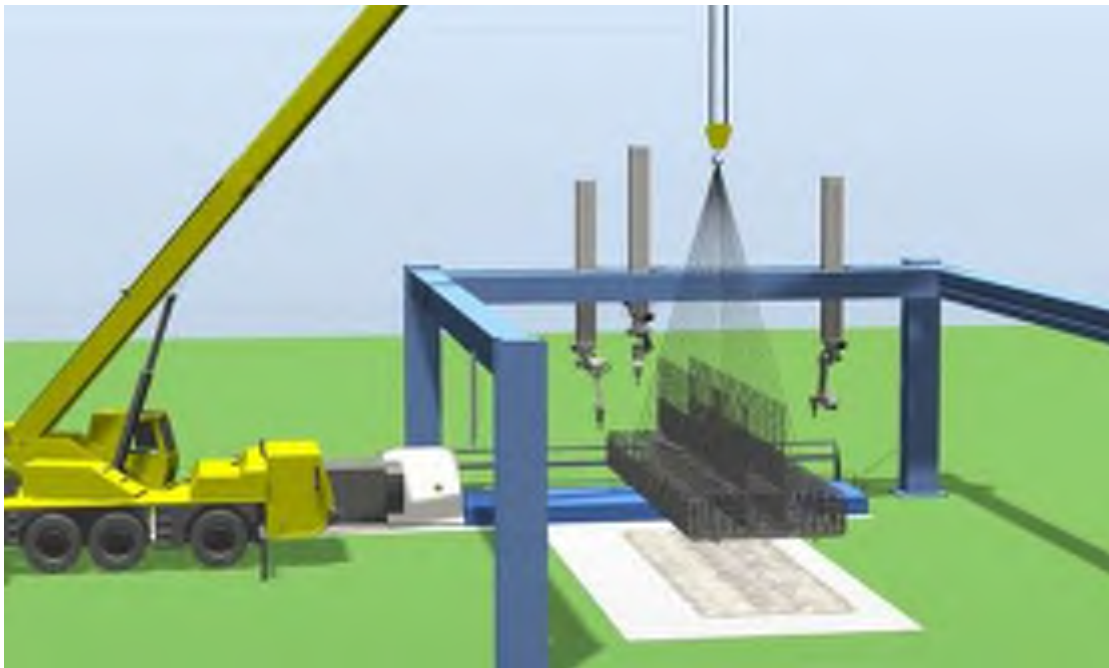
Figur 1. Koncept för automationsstation

Figur 1 ovan illustrerar det övergripande konceptet. Ramen som består av de blåa detaljerna på bilden är det som utgör den större delen av stationen. I ramen hänger 3 industrirobotar, ramen skapar rörligheten för robotarna så de kan positionera sig inom ramen. Vid sidan är tanken att armeringsjärnen ska matas in. Där ifrån är den konceptuella tanken att roboten ska hämta armeringsjärnen och sedan placera dem innanför ramen som är själva arbetsytan.



Figur 2. Bygge av armeringskorg

Figur 2 visar hur robotarna har börjat bygga vidare på armeringskorgen som visas i mitten av stationen.



Figur 3. Färdigställd armeringskorg som lyfts iväg av lyftkran

Figur 3 visar ett slutskede då robotarna har byggt klart en armeringskorg. Då måste armeringskorgen lyftas iväg och ge plats för att skapa en ny. Figur 3 visar hur armeringskorgen lyfts iväg med hjälp av en kran i detta fall. Detta koncept har robotdalen även visat går att göra i liten i skala genom att bygga en nerskalad modell (Robotdalen, 2017).

Trots att det går att göra en i en liten skala återstår det att se om det går att göra i en fullskala som klarar att bygga stora armeringskorgar. Figurerna visar konceptet i tänkt fullskala, i detta fall: 20 m x 12 m x 8 m (längd, bredd, höjd). Hur denna station ska arbeta under arbetsgång är rätt så tydlig. Dock återfinns frågan hur den ska förflytta sig från arbetsplats till arbetsplats som är nödvändig för detta koncept.

Detta arbete är en del av detta projekt och grundar sig i att göra en förstudie för att undersöka möjligheterna att produktrealisera det ovanstående konceptet och studerar hur skulle en sådan här konstruktion se ut i fullskala samt vara transporterbar. Denna autonoma station faller in i kategorin för transporterbart autonomt produktionssystem som nämndes i början. De har som nämnt i början ansetts som en för stor teknisk satsning för att genomföra och få ekonomisk avkastning tillbaka. Dock med detta koncept och med denna applikation så tros det vara möjligt att genomföra samt att det skulle ge en stor vinst tillbaka rent tidsmässigt, ekonomiskt och arbetsbelastningsmässigt om det går att realisera. Genom att undersöka hur en sådan här station kan se ut kan det grunda sig i om det är ekonomiskt värt att genomföra detta arbete och på så sätt vara ett steg att påbörja autonom produktion på byggarbetsplatsen.

Dock är detta ett utvecklingsprojekt med få gränsvärden som låser projektet vilket resulterar i väldigt många variabler som kan variera i arbetet. Riktvärdena är i princip att undersöka hur denna station kan befinna sig vid rätt plats vid rätt tidpunkt och fungera på exakt samma sätt varje gång den används samt vara rimligt realistisk att realisera.

Att inte ha några fasta gränsvärden kan ha en fördel då premissen för arbetet inte ska låsa sig vid några fasta ramar vid utvecklingen utan det uppmuntras att studera alla lösningar som är rimliga. Dock är nyckelorden här lösningar som är rimliga och det måste finnas en gemensam konsensus för rimligt realistiskt. Att undersöka alla typer av lösningar kan även vara enormt tidskrävande och det är svårt att sätta en gräns för rimligt realistiskt. Detta arbete har då valt att låsa vissa variabler för att inte dra ut på tiden som inom projektgruppen diskuterats för att falla in som då rimligt realistiska.

En av dessa variabler är transportbarheten. Då inga fasta resursbegränsningar är satta angående transport är antalet lösningar i princip oändliga. För att hantera detta kommer arbetet låsa sig till att använda sig av standardiserad lastbehållare. Om stationen kan förflyttas från en plats i en standardiserad lastbehållare kommer det fylla kravet att anses som rimligt realistiskt och praktiskt att transportera. Även om det inte ger ett tidsspann eller vilka resurser som krävs för att flytta en lastbehållare, är det förstått att det kommer gå att förflytta den. Det kommer även att gå inom ett tidsspann som anses rimligt.

För denna rapport kommer begreppet standardiserad transportlösning användas. Detta är inget vedertaget begrepp. Det kommer dock användas i denna rapport som ett sorts samlingsbegrepp för transportlösningar. Begreppet kommer innebära att det följer riktlinjerna för en vanlig transport och ingen transportdispens dyker upp. Det menas att det följer den svenska myndigheten transportstyrelsens föreskrifter att lasta lagligt. Det innebär att även att ingen transportdispens ska behöva ansökas ifrån trafikverket för att utföra en transport. Det innebär även att det ska gå att lasta via lastbil, båt eller tåg. Genom att använda begreppet standardiserad transportlösning är ett sätt att förtydliga resonemanget rimligt sätt att transportera. I och med att om det faller inom lagsystemet, inget speciellt fordon eller intyg måste användas eller sökas för att transportera så ses det som ett rimligt sätt att utföra en transport. Exempel då på en standardiserad transportlösning är då standardiserade lastbehållare. Ett annat ord för standardiserade lastbehållare är ISO-containerar.

Exempel på att transportera något som inte går att transportera innanför begreppet standardiserad transportlösning är de största armeringskorgarna som har dimensionerna 12 x 8 x 4 m (Längd, Bredd, Höjd). Detta går emot transportstyrelsens föreskrifter transport då de menar på att maxbredd för last är 2,6 meter (Transportstyrelsen, 2018)

Då de största armeringskorgarna ej heller får plats i en de största ISO-containerarna och stationen i sig kräver en större storlek än armeringskorgarna leder det till att stationen i sin helhet ej kommer få plats i en ISO-container. Detta leder slutsatsen att stationen måste vara monteringsbar för att kunna få plats i en ISO-Container. På så vis påverkar standardiserad lastbehållare begreppet för transporterbar till att stationen istället ska vara monteringsbar och kunna få plats i en lastbehållare. Monteringsbar och få plats i en lastbehållare kommer alltså vara det som används som riktvärden för stationen.

I och med att detta arbete grundar sig i att göra en förstudie för att produktrealisera en station som faller in i kategorin för mobil fabrik som jobbar för byggbranschen kan det vara intressant att använda arbetet som en fallstudie för att se hur en transporterbar station kan se ut. På det sättet kan det även vara intressant att se hur stationen kan användas för fler applikationer än bara armeringskorgar. Det har tidigare ansetts som det inte finns en ekonomisk vinning med att använda automatisk produktion på plats med de koncept som har utvecklats tidigare. Dock med denna applikation och detta koncept finns den chans för en stor vinning om detta koncept skulle vara praktiskt genomförbart. Det finns då en stor drivkraft att satsa på detta koncept.

Sammanfattningsvis är bakgrunden till detta arbete att det är en del av ett helhetsprojekt att utveckla en automationsstation för armeringskorgar. Denna armeringsstation har ett identifierat behov av att befinna sig vid byggarbetsplatsen och således ska stationen förflytta sig från arbetsplats till arbetsplats. Metoden att förflytta har valts att utnyttja standardiserade lastbehållare. Då stationen i sig påvisat sig vara större än behållaren för transportlösningen leder det till att stationen måste vara monteringsbar. Det har gjorts koncept och modeller på denna station och detta arbete är till för att gå vidare med koncepten och produktrealisera det för att studera hur en sådan här station kan se ut i fullskala.

I och med att det finns ett intresse inom byggbranschen för autonoma produktssystem som kan förflytta sig mellan platser på ett praktiskt sätt kan detta arbete studeras från ett mer generellt perspektiv. Detta innebär att om det är möjligt att utveckla en sådan här station för armeringsjärn kanske det är möjligt att använda den till fler områden än bara just att bygga armeringsjärn. Att produktrealisera denna station agerar därmed lämpligt som en fallstudie för att studera hur ett autonomt transporterbart produktionssystem kan se ut.

2.2. Problemformulering

Den tekniska konstruktionen som studien kommer utgå ifrån kommer bestå av flera olika konstruktionsområden och delsystem som var för sig innebär olika utmaningar att lösa. Nedan här beskrivs de övergripande stora problemen med att bygga en sådan här konstruktion. Då detta redan har visat att det i grova drag redan går att genomföra i mindre skala i praktiken är den stora skillnaden i detta arbete själva storleken. Genom att skala upp stationen följer en del problem, exempelvis nämnt ovan är att det blir mer resurskrävande att transportera stationen. Väldigt förenklat sagt då är problemet för denna station att den är så väldigt stor.

För att bygga en sådan här station krävs en väldigt fin precision för robotarna som utför den automatiska processen. Detta är för att robotarnas uppgift är att lokalisera en najningspunkt och knyta ihop den samt att lyfta och bära ett armeringsjärn på plats. Detta är möjligt genom ett kalibreringssystem som fungerar som så att en kalibrering sker först för att skapa en tredimensionell världsbild för robotarna. Denna kalibrering genomförs genom att en robot rör sig igenom hela arbetsmiljön samtidigt som en totalstation följer robotens position och sedan för in positionerna i ett digitalt system.

När kalibreringen är genomförd har robotarna tolkat hela arbetsmiljön och utrymmet som de jobbar efter, de är med andra ord redo att börja bygga en armeringskorg. Det är därför en viktig egenskap av denna automationsstation att under processen som korgen byggs att denna station inte ändrar på sig förens en ny kalibrering har gjorts eftersom robotarna jobbar efter den världsbild som de har skapat under kalibreringsprocessen. Detta innebär att automationsstationen måste vara tillräckligt styv för att inte deformeras under arbetsgången eller sitta ihop så pass bra att ingen vitalkomponent har rört på sig. Att skapa denna noggrannhet ställer även krav på drivsystemet och styrsystemet för konstruktionen så att robotarna kan hitta till de kalibrerade positionerna. Ett annat sätt att beskriva detta på är genom repeterbar noggrannhet. Det betyder att samma moment ska kunna repeteras om och om igen på exakt samma sätt. Med andra ord innebär det att roboten ska kunna hitta tillbaka till samma position flera gånger. Hur nära samma punkt och hur noggrant roboten måste återkomma till samma punkt är svårt att säga exakt men de finns visa normvärden för detta (Robotdalen, 2017). För normvärden se kapitel 5 tillämpad lösnings metodik avsnitt 5.4.1 Val av kranbalkssystem.

Det som gör det svårt att säga exakt med vilken noggrannhet stationen måste arbeta på är för att det beror på väldigt många olika faktorer. Dels beror det verktyget som najar ihop, Hur armeringsjärnen knytpunkter för najning ligger an mot varandra, Vilken robot det är som används etc.

För att hantera detta introduceras begreppet ”effektivt använda robotarna”. Att effektivt använda robotarna betyder det att robotarna användas för att lokalisera och hitta najningspunkter och najar ihop knytpunkterna för armeringsjärnen. Det vill säga att det användas med rätt avsikt. Det innebär att stationen inte bara ger möjligheten för att transportera robotarna men robotarna kan även användas för avsiktlig arbetsuppgift, att naja ihop robotarna.

Nämnt i det föregående avsnitt är den bestämmande faktorn för hur stor stationen behöver vara storleken på armeringskorgar. Detta medför ett problem och det är att ju större en konstruktion är desto svårare är det att jobba med noggrannhet och precision. Detta är i och med att större detaljer innebär större deformation och så sätt svårare att kontrollera mer noggrant. Detta grundar sig i klassisk hållfasthet.

För att skapa det utrymme som armeringskorgarna kommer den slutgiltiga stationen även bli för stor att få plats i ett stycke i en fraktcontainer och därför måste det även vara möjligt att göra stationen monteringsbar så det går att plocka isär stationen och sätta ihop den igen. Att den måste få plats i en fraktcontainer var givet för att hantera som transportmedel och kunna förflytta stationen från plats till plats. Detta gör att stationen får två läge. Ett transportläge och ett arbetsläge. I transportläget ska stationen få plats i en fraktcontainer och i arbetsläget ska stationen medge tillräckligt med utrymme för att bygga de flesta typer av armeringskorgar samt att ge utrymme för robotar att arbeta på.

Att stationen ska vara monteringsbar går att diskutera i och med att i stort sett alla konstruktioner går att plocka isär i mindre bitar. Med det sagt går det att resonera att alla konstruktioner är monteringsbara. Då begreppet monteringsbar innefattar hur enkel en konstruktion är att montera handlar monteringsbarhet om ergonomi och resurser. Det vill säga vad som behövs för att montera den slutgiltiga sammanställningen och hur lång tid det får ta. I detta fall är tidsfaktorn resonerad att det får ta tre dagar att montera ihop denna konstruktion. Detta är enligt projekt anvisningar se kapitel 2.4.

Det som spelar roll i detta sammanhang är då hur lång tid det går att sätta ihop detaljerna för sammanställningen samt hur enkelt det är. Med hur enkelt eller svårt de tar att plocka sätta ihop en sammanställning beror på hur väll delarna spelar och passar mot varandra samt hur mycket verktyg som behövs. Hur enkelt parterna passas in mot varandra gynnas av att toleranser är grova och att det är stort spel mellan detaljerna.

Dessa två lägen kräver då egenskaper av denna automationsstation skär mot varandra. Att det ska skapas en väldigt fin precision som ej förändras under användning. Men det ska göras med av en väldigt stor konstruktion som är monterbar som kräver då väldigt grova toleranser.

Denna station ska även finna en lösning som är rimlig att realisera. För detta arbete kommer rimliga att realisera innebära att den ska gå att konstruera med tillverkningsmetoder som är redan beprövade och har använts förut. Därmed ska samtliga lösningar för detta arbete kunna genomföras från en redan etablerad tillverkningsmetod.

Sammanfattat är problemet som ska undersökas i detta arbete om det går att tillverka en så stor automationsstation som är monteringsbar med standardiserade tillverkningsmetoder idag som medger en effektiv användning av robotarna.

Ett annat sätt att uttrycka problemet är med frågan: Går det verkligen att bygga en station som medger repeterbar noggrannhet och tillräckligt fin precisionen för effektivt användande av industrirobotar trots storleken och monteringsmomenten?

2.3. Syfte och frågeställningar

Syftet med det här arbetet är att undersöka möjligheten att konstruera en fullständig automationsstation som är monteringsbar och visa att det teoretiskt går. Det innebär att komma så nära som möjligt en fullständigt teoretiskt produktrealiserad konstruktion. Konceptet som har valts att utgå ifrån kommer agera som fallstudie för att studera hur en sådan här konstruktion kan se ut.

Konceptet för denna automationsstationen ska ersätta det manuella byggarbetet som krävs för att sätta ihop och naja ihop en armeringskorg på byggarbetsplatsen. Detta är för att få ett snabbare och mindre resurskrävande arbetssätt som ger lika mycket eller högre kvalitet än dagens arbetssätt.

En viktig aspekt i denna studie är att undersöka hur en sådan station ser ut i praktiken. Att undersöka detta innebär då om det går att tillverka denna station i full skala som kan bygga alla typer av armeringskorgar. Nämnt i föregående kapitel är den bestämmelse som avgör om det realistiskt att tillverka är om det går att använda sig av en tillverkningsmetod som redan har använts. Det vill säga att det avgränsar sig ifrån att behöva använda tillverkningsmetoder som ej har använts förut.

Projektet handlar till stor del om det är möjligt att tillverka en sådan här konstruktion med de förutsättningar som har angivits och vad det skulle innebära. Fokus är alltså på om det går att automatisera processen, går det att effektivt använda robotarna i arbetsläget, går det att montera stationen, går den att i nermonterat läge få plats i en fraktcontainer?

Då arbetet agerar som en fallstudie för att studera transporterbara automationsstationer på en generell nivå dyker följande frågeställning upp:

F1. Hur ser en automationsstation ut som kan transporteras med en standardiserade lastbehållare och effektivt använder de kraftigaste industrirobotarna samt framställer produkter som är för stora för kraven av en standardiserad transportlösning.

Att frågeställningen använder sig av uttrycket de kraftigaste industrirobotarna är för att täcka så många användnings områden som möjligt och förarbetet för projektet har lett till att en av hypoteserna innan är att just denna station kommer behöva använda sig av de kraftigaste industrirobotarna som går att få tag på.

2.4. Projektets riktlinjer

Det här arbetet är en del av ett större projekt för hela utvecklingen av denna automationsstation. Inom projektet arbetar Skanska, Robotdalen, ABB med flera för att få ihop denna station. Inom arbetet har det tillkommit riktlinjer att förhålla sig till.

1. Undersöka möjligheterna att bygga en automationsstation som ger möjlighet att bygga en armeringskorg samt utrymme för industrirobotar att röra sig i.
2. Automationsstationen ska vara möjlig att monteras ihop och isär.
3. Automationsstationen ska vara möjlig att monteras ihop på 3 dagar.
4. Automationsstationen ska kunna väl nermonterad få plats i en standardiserad lastbehållare.
5. Automationsstationen ska kunna monteras på en färdig betongplatta i en tälthall.
6. Undersöka möjligheterna att tillverka automationsstationen.

Dessa riktlinjer sätter krav på förstudien men är inte helt nödvändiga för att svara på forskningsfrågan. Exempelvis att montera stationen på en betongplatta i en tälthall. Dock är det en riktlinje för studien och kommer agera som krav för arbetet.

2.5. Avgränsningar

Detta arbete har genomförts som ett examensarbete i kursen examensarbete produktutveckling KPP502, Följande avgränsningar har gjorts för att genomföra detta projekt:

Början av ett projekt och det inte behövs några avgränsningar utan det uppmuntrades att arbeta med fria tyglar. Detta skulle innebära ett enormt tidskrävande arbete och för att göra det mer hanterbart har följande avgränsningar satts:

- Det här projektet är i samråd med många företagspartner. Bland annat är en företagspartner ABB. ABB förser automationsstationen med ett robotsystem. ABB är en av de lämpligaste leverantörerna av robotsystem i Sverige. En avgränsning för detta projekt är således att automationsstationens utformning kommer använda sig av ABB:s robotsystem. Således måste konstruktionen vara kompatibel med ABB:s robotsystem. Detta sätter begränsningar på konstruktionen i och med att ABB:s robotsystem har konstruktions begränsningar.
- Inom det här projektet har det diskuterats att använda sig av olika material som ej är traditionella inom gantry bygge. Bland annat har det funnits en diskussion om att använda sig av kolfiber som bärande material. Detta har avgränsats ifrån att inte undersökas och är ett aktivt val då de material som används som grundstruktur är de som har gått på rekommendationer från kunnigt branschfolk. En annan anledning till att inte kolla på andra material än de rekommendationerna som har givits av branschfolk är att detta projekt innehåller många innovativa delar och risker och således finns argument för att ta säkra kort där de går att ta säkra kort.
- Detta arbete har genomförts med hjälp av produktutvecklingsverktyg där de bland annat ingår att man bör kolla på miljöpåverkande aspekter och livscykelanalys för produkten. Dock har miljöpåverkan för konstruktionen ej studerats, Vissa beslut har tagit stöd av argument för konstruktionens livscykel men ingen aktiv del av livscykelanalys är gjort

för konstruktionen. Detta är i och med att det ej har ansetts högt relevant i förhållande till forskningsproblemet.

- De ekonomiska delarna av konstruktionen har ej tagits i beaktande då det inte har angivits någon budget för konstruktionen. De har bara kommit i beaktande då leverantörer och branschfolk har sagt att det är en begränsning för dem själva.
- Till denna automationsstation har de bara kollats på hur konstruktionen ska se ut för att förflytta robotarna. Det har ej kollats på hur armeringsjärnen ska tillföras till arbetsytan eller hur verktygen som robotarna ska använda sig av ska se ut. Dock har de delar som tillförsel av armeringsjärn och arbetsverktyg som påverkar konstruktionen tagits i beaktande enligt anvisningar. Det har ej heller studerats hur grunden för armeringsjärn ska fästas på arbetsytan.
- Tillförsel av el och tryckluft till systemet har ej kollats på
- Industrirobotar som är tänkt att använda kommer i olika varianter. De varierar i hur starka de är och hur de kan användas. Det betyder hur mycket de kan lyfta och ha som arbetsvikt. I detta projekt kommer de vara tunga grejer relativt för vad en industrirobot kan lyfta. Hur stora de är påverkar även hur de kan monteras. Det vill säga en del robotar kan monteras på tak, väggar och golv. De största robotarna enbart golv-monteras och ej sättas mot fast mot tak och eller vertikalt. För att denna station inte ska begränsa sig i möjligheten för montering kommer de vara tvunget att använda sig av industrirobotar som kan monteras på alla sidor. Detta projekt kommer kalla dessa robotar för flersidigt monteringsbara robotar. Begreppet de kraftigaste industrirobotarna som används i forskningsfrågan kommer därmed syfte på de kraftigaste industrirobotarna som kan monteras på alla sidor.

2.6. Mål

För att uppnå syftet hur en automationsstation kan se ut har 6 mål sats upp. Då förutsättningen till en början är att undersöka vad som är realistiskt att göra från början har dessa mål sats upp som måttstockar för att mätas emot.

1. Ett övergripande koncept för en konstruktion som medger rörelse för robotarna att röra sig inom ett utrymme för montering av de största armeringsjärn.
2. Montering för automationsstationen ska vara monterbar på en betongplatta inom loppet av 3 dagar.
3. Konceptet ska i nedmonterat läge få plats i en 40-fots container.
4. Visa att med beräkningar att robot kan röra sig till en punkt inom kravet för precision i ihop monterat läge.
5. Möjlig att tillverka med redan testade tillverkningsmetoder.
6. Samtliga komponenter från leverantörer måste vara testade innan.
7. En produktrealiserad CAD-modell som visualiserar tanken med konstruktionen som ska förflytta robotarna och linjerar med projektets riktlinjer och de övriga målen.

Innebörden av mål 2 och 3 fokuserar emot monteringsmöjligheterna för konstruktionen.

Mål nummer 4 anspelar på att använda robotarna effektivt. Precision graden är som nämnt innan svår att exakt ge värde på, Se kapitel 5.4.2 för mer detaljerad info om detta.

Mål 5 och 6 är avsedda på sådant sätt att det ska undersökas om det är rimligt att tillverka denna konstruktion. Tillverkningsmetoder kan exempelvis vara bearbetnings maskiner som fungerar och kan ta in de detaljer som ska bearbetas. Det ska inte behövas utvecklas en ny maskin för att kunna tillverka denna konstruktion. Om ingen beprövad tillverkningsmetod finnes för att kunna tillverka konstruktionen anses det som att det är utanför gränsen att rimligt realistiskt genomföra denna konstruktion. Det vill säga att det inte finns utrymme att använda sig av nya inventioner av tillverkning eller användning av helt nya komponenter på marknaden.

Det sista och första målet i sig är ämnat för att visualisera och skapa ett övergripande medel för att på ett sammanhängande vis kunna redovisa resultatet. Dessa mål i sig anser författaren själv är svaga då det är väldigt lätta att mäta och svåra att misslyckas med. Dock anses de ändå nödvändiga för att kunna på ett enhetligt sätt visa upp de övriga målen.

3. ANSATS OCH METOD

Detta kapitel redogör vilken metodik och arbetssätt som detta arbetet bygger på. Kapitlet beskriver även på vilket sätt som data har hanterats för att utvärdera och dra slutsatser ifrån.

3.1. Metodik

Syftet för detta arbete anspelar på att studera hur något kan se ut som en färdig produkt kommersiell produkt och till stor del av direktiven är till för att funderingar finns för att se hur det ska fungera i verkligheten. Överlag är detta arbete en del av ett större arbete som präglas starkt av att ses som ett forsknings och utvecklings projekt inom produktutveckling.

Forskning inom detta område är till för att samla in ny kompetens för nya produkter, tjänster, produktionssystem. Undersökningar inom detta brukar även kännetecknas genom att genomföras med hjälp av fallstudie (Wiktorsson, 2017) Upplägget av arbetet ansågs därmed lämplig att genomföras som en fallstudie.

Björn Fagerström sammanfattar valet av forskningsmetod genom att det beror på vilket synsätt forskningen har. Ett Analytiskt, Systematisk eller tolkande synsätt. Han förklarar detta med hjälp av en tabell där analytiska synsätt erhåller forskningsfrågor som tyder på orsak – verkan samband och leder till studier som kan ses experimentella och bedrivs med mätningar och enkäter. Systematiska synsätt och tolkande synsätt behandlar forskningsfrågor präglade av komplexa samband, beskrivande och utforskande som leder till en strategi att utforma metodologin i form av fallstudier, observationer, intervjuer (Fagerström, 2017). De

Då detta arbete riktar till att undersöka just hur en konstruktion kan se ut i slutändan faller detta in mer mot de synsätt som adresserar mot fallstudier, observationer och intervjuer. Detta är för att det anses finnas alldeles för många variabler som är svåra att låsa och mäta. Forskningen och syftet präglas inte heller av något orsakssamband som går att mäta eller experimentera. Detta faller även in med det Magnus Wiktorsson förklarar i föreläsning om forskning inom produktutveckling att en lämplig strategi för forskningen när den präglas av en fråga som grundar sig i hur något kan se ut och har fokus på samtida event så är en lämplig strategi just fallstudie (Wiktorsson, 2017).

Det har då utesluts att en fallstudie har lämpat sig som den övergripande metoden att arbete ifrån. Då ämnet i sig är väldigt nytt är det svårt att hitta redan befintlig relevant forskning inom området. Detta har medfört att ingen omfattande litteraturstudie har gjorts då det ansetts att inget större mervärde till arbetet har medfördes. Dock har litteratur använts som bidragande stöd till arbetet inom områden där det ansetts relevant. Valet av att göra detta till en fallstudie även är center till valet av metod är för att behovet att göra en förstudie för att produktrealiseringen av detta arbete och arbetsmetoden lämpar sig bra till att undersöka detta arbete.

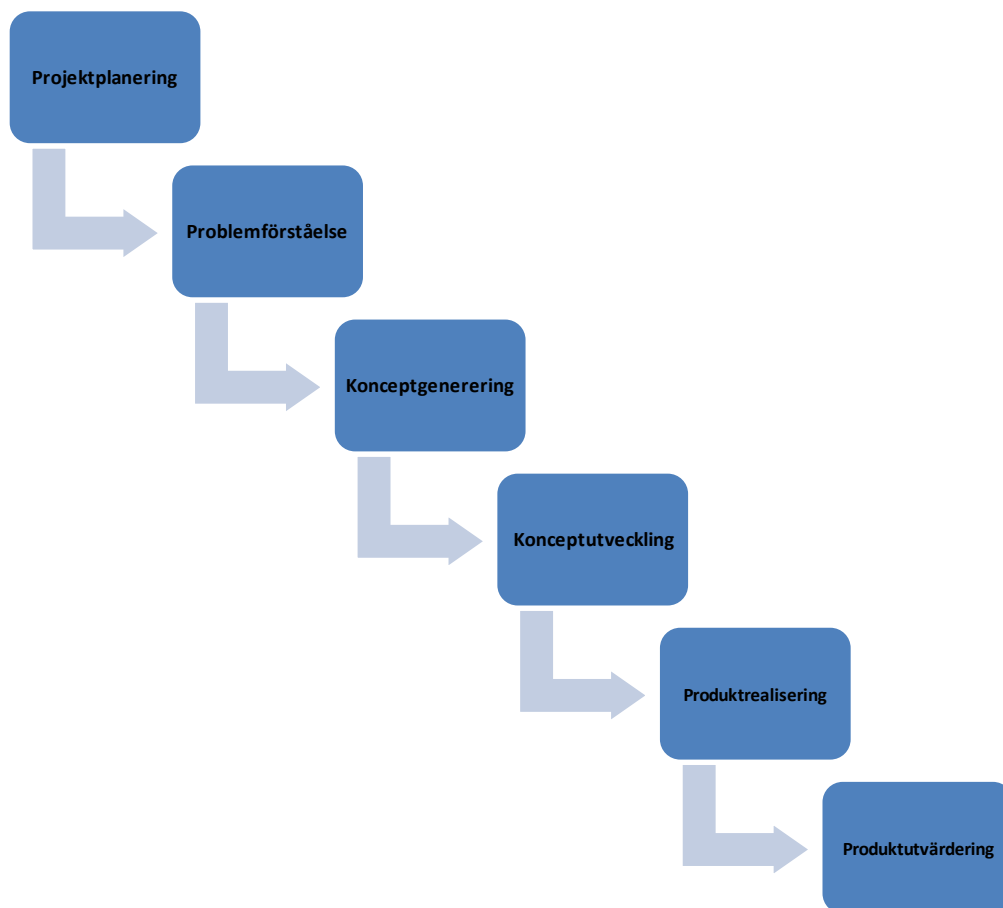
Fallstudien har i slutändan då lämpat sig som den övergripande metoden genom arbetet. Detta faller även naturligt med det syftet arbetet och den bakgrunden som arbetet har. Studien i sig har präglats starkt av produktutvecklingsmetoder. Detta är med argumentet att det är del av ett utvecklingsarbetet som går ut på att gå ifrån ett etablerat koncept till en verklig konstruktion. Studien kan från ett perspektiv ses som en förstudie för hur konceptet kan produktrealiseras. För att genomföra denna studien har en produktutvecklingsmetodik valts. Dels för de är till för att effektivisera ett produktframtagande Det är även ett lämpligt sätt att systematiskt arbeta och dokumentera arbetet. Då kunden är i centrum för produktutveckling och inte detta fall handlar

det mycket om att undersöka möjliga lösningar har produktutvecklingsprocessen som valts anpassat efter vad som ansetts bidra med mervärde till arbetet. På så sätt har produktutveckling fungerat som stöd till hela processen då de systematiska arbetssättet anses som en lämplig strategi för arbetet och de verktyg som används inom produktutveckling uppfattas relevanta (Ullman, 2010).

Sammanfattat är strategin för fallstudien att använda produktutvecklingsmetodik som beskrivs nedan:

3.2. Produktutvecklingsmetodik

Det finns flera produktutvecklingsprocesser att arbeta utifrån beroende på vad som ska utvecklas. Då detta arbete behandlar mekanisk konstruktion kommer arbetet riktiga in sig mot en kvalitetssäkrad metodik tillriktad mot mekaniska konstruktioner. Processen som har valts presenteras av David G Ullman som beskriver en steg för steg arbetsgång. Detta innebär att dela upp hela utvecklingsprocessen i olika faser där varje fas följer varandra. Denna metod visas nedan i figur 4.



Figur 4 - Produktutvecklingsprocessen presenterad av Ullman (Ullman, 2010)

Nedan följer mer ingående vad varje fas inbegriper och hur den har modifierats för att anpassas till arbetet.

3.2.1. Projektplanering

Under projektplaneringsfasen som är den inledande fasen av projektet menar Ullman att här ska det allokeras vad som behövs göras för utföra projektet samt tidsramen för följande moment. Det behövs att bestämma vad för resurser som finns i dagsläget samt projektets tidsram för att hinna med utsatta mål (Ullman, 2010).

För detta arbete innebar det till största del att kartlägga arbetet. Resurserna för arbetet och vilka verktyg som behövs för arbetet. Detta innefattar att dela upp projektet i etapper och vilka etapper som klaras av för att uppnå ett tillfredställande resultat.

Till denna fas bestämdes även då de resurser och verktyg som skulle kunna lämpa sig bra för arbetet. Följande noterbara verktyg var centrala i arbetet:

- 3D-CAD
 - 3D-CAD var ett centralt verktyg att jobba ifrån. Samtliga konstruktionslösningar och koncept under arbetets gång grundade sig i programvara Solidworks. Det användes för att dokumentera koncepten och på så sätt kunna medla mellan olika inblandade parter i projektet samt redovisa resultat.
- FEM-Analys
 - Som stöd till 3D-CAD användes FEM-Analyser som datorstödsprogram till beräkningar. Dessa användes till att användes att göra hålfasthetsanalyser till konstruktionen och verifiera beräknat data. Även Fem-Analyserna gjordes i Solidworks programvara.
- Produktutvecklingsverktyg
 - Stöd till processen för att ta arbetet vidare, se teori för dessa i kapitel 4 avsnitt 4.1. För följande beskrivning av de verktyg som användes. Verktygen i sig fungerar till stor del som tankeverktyg för att bidra med ökad tydlighet i dokumentation och hjälpa till med tankebanor och utveckling.

3.2.2. Problemförståelse

Problemförståelse som även är kallad för produktdefinition. Målet med denna fas är att få en tydlig förståelse för de problem som ligger till grund för projektet och omvandla dessa till krav för vad produkten ska uppnå. Det gäller således att identifiera alla kravställare på produkten och översätta dessa önskemål till tekniska specifikationer som är möjliga att möta (Ullman, 2010).

Då denna fas egentligen är riktad mot kunder och en etablerad marknad var denna fas tvungen att urskilja sig lite mot enligt beskrivning. Detta är i och med att kravställarna för projektet är i huvudled bakgrundsarbetet och det som projektet har identifierat i ett tidigare skede.

Utöver bakgrundsmaterialet till projektet användes en hel del av metoderna för datainsamling. Fokus för denna fas var på att förstå problemet, typ av transport att förlita sig på, storlek på den slutgiltiga konstruktionen, hur styv konstruktionen skulle vara etc. För utförlig beskrivning av datainsamlingen se näst kommande avsnitt längre ner. Denna fas resulterade i att generera en funktionsanalys för de funktioner som konstruktionen skulle uppnå. Detta i sin tur genererade en kravspecifikation som fallstudien bygger på.

3.2.3. Konceptgenerering

Med data ifrån problemförståelsefasen ska detta resultera i att kunna arbeta med koncept för att lösa problemet. Under konceptgenereringen finns många möjligheter att jobba med arbetsmetoder och produktutvecklingsverktyg för att generera så många koncept som möjligt för att möta kraven. Under konceptgenereringen förespråkas det att jobba med dessa verktyg internt inom projektgruppen eller gå utanför gruppen och studera omvärlden för lösningar. Den övergripande tanken är att se ett brett perspektiv på lösningar och alternativ att jobba med (Ullman, 2010).

Denna del av fallstudien följer i linje med hur Ullman beskriver processen. En hel del koncept utvecklades genom att ta inspiration från tidigare lösningar till olika delsystem som hade identifierats vid datainsamlingen samt så uppkom andra koncept i diskussion och möten med andra projektmedlemmar.

3.2.4. Konzeptutvärdering

Konzeptutvärderingen faller som det naturliga steget efter konceptgenereringen. Konzepten som har tagits fram i föregående steg ska utvärderas och kritiskt granskas. De ska granskas mot de krav som formulerades i problemförståelsefasen. Tanken är att väga koncepten mot varandra och se vilka som passar bäst mot de krav som ställdes i början av projektet och ta fram ett toppkoncept. På detta sätt trattas de alternativ som kollades på i föregående fas (Ullman, 2010).

Även denna del användes såsom enligt Ullmans beskrivning. Då stor del av syftet och undersökning för detta arbete är till för att undersöka hur en sådan här station kan se ut ansågs denna fas väldigt central i studien då de koncept som valdes här påverkar väldigt mycket resultatet.

Detta innebar mycket att de verktyg som nämndes ovan med CAD-ritning och FEM-analyser kom till stor användning vid konceptutvärderingen. Då detta är en mekanisk konstruktion som förlitar sig på mekaniska egenskaper gjordes hållfasthetsberäkningar för att verifiera koncepten. Majoriteten av hållfasthetsberäkningarna grundar sig i klassisk hållfasthet där mycket fokus riktades mot balkböjning. I enlighet med målen beräknades detta system emot att vara så styvt som möjligt.

3.2.5. Produktrealisering

Produktrealiseringen innebär att gå in på detaljnivå för valt koncept. Detta innebär att förfina konceptet och studera produkten på komponent och detaljnivå. Produkten ska i detta steg ses över för att gå från ett koncept till realistiskt möjligt. Under denna fas spelar andra yttre faktorer in såsom miljö, kostnad och tillverkning (Ullman, 2010).

Även denna fas hade en central del av arbetet av samma anledning som föregående fas. Då de yttre faktorerna som spelade roll då var tillverkning och hur monteringen skulle ske, hur frakten skulle kunna se ut samt platsen som stationen monteras på.

3.2.6. Produktutvärdering

Slutligen ska produkten utvärderas mot de krav som fastslogs i problemförståelsefasen. Det ska ske en generell bedömning utav produkten och om det är det bästa alternativet som har valts, dessutom ska de lärdomar som går att dra ifrån arbetets gång dokumenteras (Ullman, 2010).

För detta projekt var det ej tillämpligt att använda detta sista steg enligt beskrivning då detta är till stor del en förstudie av vad som ska tas fram och arbetet kommer inte resultera i att en slutgiltig produkt kommer att tas fram. Därmed finns ingen produkt att utvärdera ifrån. Däremot användes det för att utvärdera slutresultatet gentemot forskningsfrågan som beskrevs innan.

Att genomföra projektet med denna metod ansågs som ett lämpligt sätt att besvara forskningsfrågan och att använda sig av en modifierad produktutvecklingsmetod för fallstudien var ett tillämpligt sätt att systematiskt genomgå arbetet. Se tillämpad lösningsmetodik för att se hur metoden användes i praktiken.

Arbetet avslutades med att redovisa slutresultatet för själva fallstudien som ett delresultat. Sedan beaktades det om resultatet av fallstudien uppnådde de målen som upprättades i början av projektet.

Vidare studeras om fallstudien lyckades svara på den generella forskningsfrågan och en analys gjorde om det går att använda fallstudien och applicera den för flera applikationer.

3.3. Datainsamling

Det finns två stycken kategorier inom insamling och analysering av data. Kategorierna benämns kvalitativt och kvantitativt. Att arbeta efter kvantitativa metoder innebär att insamla information på ett formellt och strukturerat sett, informationen brukar vara av numerisk karaktär. Den kvalitativa metoden kännetecknas av att jobba nära källan och samla data med generella frågeställningar. Övergripande går det att säga att man jobbar med mjuk- och hårddata där kvalitativa metoder grundar sig i observationer, intervjuer och litteraturstudier medan kvantitativa metoder bygger på tabeller och grafer (Holme & Solvang, 1996).

Detta arbete har använt sig till största del av kvalitativa metoder då det har handlat om att undersöka något nytt utvecklingsområde där mycket tidigare erfarenheter har spelat stor roll för att ta till sig vad som fungerar och inte. Mycket information som påverkar utformningen av resultatet är besittande information hos människor som har jobbat med liknande produkter förut. Detta är även eftersom att ämnet att konstruera en sådan här konstruktion som arbetet centrerar sig runt är väldigt litet och nischat. Insamling av data skedde succesivt under hela arbetsprocessen då det hela tiden krävdes ny information.

De främsta metoderna som använts till detta arbete har skett via intervjuer med konstruktörer eller samtal med leverantörer som ansetts lämpliga för ändamålet. En del kompletterande fakta har funnits i litteratur och handböcker som stöd.

3.3.1. Intervjuer

Stor del av arbetet skedde via intervjuarbete. Intervjuarbetet skedde antingen via telefon, mötesform eller via mail och detta skedde kontinuerligt under arbetets gång. Ett problem med arbetet har varit att det är ett nytt område och många variabler som påverkar utformningen av konstruktionen olika mycket. Det vill säga att vilken kompetens och frågor som behövdes tas reda på var inte helt känt ifrån början.

Det resultera i att intervjuerna fick en utformning utav att vara ostrukturerade eller semi-strukturerade. Intervjuerna fick därmed en utformning av att utgå ifrån diskussionspunkter som var relevanta för vilken fas som projektet befann sig i och sedan sammanfatta nyckeldelarna från intervjuerna i efterhand.

Den kompetens som ansågs att eftersökas var inte heller alltid aktuell och det var tvunget att anpassa sig efter behov. Därmed skedde uppkom en del oplanerade intervjuer då det lämpade sig bäst med de personer som fann sig tid att kunna besvara frågeställningarna.

Intervjuer var en central del av arbetet då de användes i slutändan inte enbart som metod för datainsamling utan även som metod för att verifiera vissa slutsatser och koncept. Då vissa slutsatser och koncept har tagits fram användes sedan intervju-objekt som innefattade kunskap inom specifikt område för att verifiera om slutsatsen är korrekt dragen och att det fungerar på det sättet som det gör. Intervju objekten som valdes var samtliga personer som arbetade med utveckling inom efterfrågat område. De satt alla därmed antingen inom utvecklingsavdelning för företaget som kontaktades eller jobbade med utveckling rent aktivt inom teknik.

Undantag för detta var då maskinverkstäder kontaktades då de inte arbetar med nyutveckling i sig utan är mer inriktade att tillverka produkter. De som kontaktades inom maskinverkstäderna var de som agerade som verkstadsansvariga.

Sammanslagen information för centrala intervjuer har sammanställts i bilaga 11. Dock är detta inte sammanställt från exakt alla frågeställningar och möten som har gjorts under projektet. I slutändan var det svårt att redovisa exakt varenda fråga som har ställts. Vissa anteckningar är även inte tillräckligt tydliga för att anses redovisningsbara och bidra till mervärde. Det som sammanställts i bilaga 11 är diskussionsmöten som och konversationer som har haft stor inverkan på projektet. Ger även en tydlig bild över hur frågeställningarna har gått till och genomförts.

3.3.2. Tekniskt dataunderlag

Då arbetet förlitar sig på att studera hur det går att praktiskt genomföra konceptet har det använts stor del av dataunderlag från leverantörer som anses relevanta till utformningen av automationsstationen. Detta innebar teknisk information från leverantörer som levererar dataunderlag i form av produktblad till sina komponenter. Det tekniska underlaget kom från bolagen: ABB, Stålbyggnadsinstitutet, SKF, ATLANTA, Be Group och Skanska.

3.3.3. Litteraturstudie

Som stöd till arbetet användes litteratur för att öka förståelsen inom området. Litteraturen fungerade som komplement till studien och gav grund inom vissa problemområden för arbetet. Litteratur som har begrundats har varit internet källor, böcker och artiklar från databaser. Litteraturen var inriktad mot automation och mekaniska tekniska konstruktioner. De databaser som har använts för att hitta artiklar inom ämnet har varit: Google Scholar, Academic Search Elite, Cinahl plus och Science Direct

Sökorden för dessa databaser har varit: transportable factory, automation construction, mobile automation, precision within automation, effective assembly, production within construction, mounting assembly station.

Att studera den forskning som finns inom området för dessa sökord har visat att det finns förhållandevis lite studier om mobila produktionssystem som kan användas som jämförelse. Studierna pekar mot att detta är ett gott koncept som skulle vara användbara i praktiken men än så länge inte fått något genomslag.

Litteratur och faktaböcker som har använts för arbetet har berört: Automation, Robotik, Teknisk konstruktion, stålbyggnationer, teknisk hållfasthet. Produktutveckling och effektiv montering.

3.3.4. Omvärldsanalys

Utvecklandet av koncepten för konstruktionen har delvis använt sig av att studera befintliga lösningar i olika varianter. Metoden för att studera befintliga lösningar har till mestadels förlitat sig på internet-sökningar via sökmotorn Google.

Den övergripande konstruktionen i sig består av många delsystem som integrerar ihop med varandra. Vissa delsystem var enklare att hitta varianter på en andra. Exempel på system som gav många träffar och sökningar på var styrningar och drivning.

Andra system som var svårare att hitta befintliga lösningar på var till exempel helhetskonstruktionen för konceptet. Till detta studerades då företag som arbetade med liknande konstruktioner. De företag som studerades mest var Andon Robotics och Kranendonk. Dessa företag arbetar med att konstruera ställningar för automationsarbete. Andon Robotics var till stor del en stor datakälla som användes i detta arbete.

Många delsystem studerades befintliga lösningar med leverantörer för tekniska lösningar. Det var många leverantörer som studerades för arbetet men huvudleverantörerna som erbjöd tekniska lösningar var: Mekanex, SKF, EIE Mechanics och Acumo.

3.4. Kvalitetssäkring

Att ha en systematisk process för produktutvecklingen och informationsinsamlingen ligger till grund för att säkerställa kvalitén för arbetet. Nedan diskuteras hur kvalitén och värdet av resultatet kan påverkas av metodvalet.

3.4.1. Primära och sekundära källor

Hur tillförlitlig information är kan skilja sig om källan är sekundär eller primär. Om data har tagits direkt som en förstahandsstudie räknas den som en primär källa och är en direkt observation av verkligheten. En sekundär källa grundar sig från en primär källa där den återberättas i någon form. Ofta å brukar det vara i form av litteratur eller intervju (Bell, 2009).

Till stor del har detta projekt präglats av frågeställningar och intervjuer med folk som ansetts kunniga inom området. Detta kan påverka tillförlitligheten inom viss information då människor som arbetar med detta kan ha andra avsikter än att bara tillförse med information. Därmed har det vid tillfälle gjorts en avvägning om det går att dubbelkolla informationen med flera olika parter. Vid vissa tillfällen har detta inte gått i och med att de personer som har tillfrågats tillförsett information som är sällsynt och svårt att få att tag på från någon annan. Exempelvis leverantörer av vissa speciella produkter. Denna sällsynta information har då ansetts tillräckligt tillförlitlig att gå vidare med i och med de källor som har angivit denna information har visat stor kunskap inom området.

3.4.2. Reliabilitet och validering av information

Detta projekt har använt en stor mängd sekundära källor och använt sig av många rekommendationer från erfarna konstruktörer och experter inom specifika områden. Därmed finns en risk att alltför stora generella slutsatser kan ha tagits vid tillfällen för att fylla igen vissa luckor. En strävan efter att upprätthålla objektivitet och rimliga antagande för att fylla igen dessa luckor har upprätthållits genom hela projektet men i och med att stor del av resultatet bygger på sekundära källor finns risken att vissa områden bör dubbelkollas. Dessa områden beskrivs i det avslutande kapitlet slutsats och rekommendationer.

Även en del av målen har verifierats och mäts av med hjälp av intervjuer och frågeställningar till personer som anses besitta informationen för att validera att vissa koncept och lösningar stämmer. Då koncepten måste valideras av en annan part har ansatsen gjorts för att försöka få så många perspektiv som möjligt till frågeställningen.

4. TEORETISK REFERENSRAM

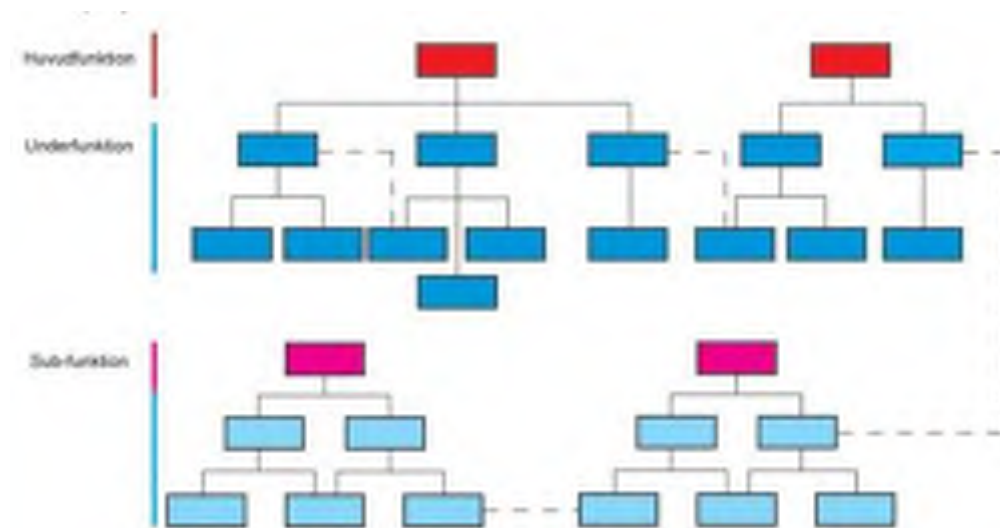
Den teoretiska referensramen är samlingen av de viktigaste delarna av datainsamling. Till största del ligger teorin i detta kapitel som grund till utförandet av arbetet.

4.1. Produktutvecklings verktyg

I produktutvecklingen har produktutvecklingsverktyg använts som stöd för att föra projektet framåt.

4.1.1. Funktionsanalys

Detta verktyg bygger på de marknadskrav som har samlats in. För att säkerställa och tolka kraven rätt använts detta verktyg för att analysera hur produkten ska fungera. Tanken med en funktionsanalys är att identifiera produktens huvudfunktioner som produkten måste kunna göra för att möta marknadskraven. Dessa huvudfunktioner delas upp i mindre så kallade underfunktioner. Underfunktionerna definieras som vad som behövs uppnås för att huvudfunktionen ska fungera. Denna undergrupp möter alltså inte marknadskravet direkt men står i relation till huvudfunktionen och måste uppnås för att huvudfunktionen ska kunna fungera. Slutligen finns så kallade sub-funktioner som skiljer sig från de vitala funktionerna. Dessa funktioner räknas till som mindre viktiga för att produkten ska fungera och står inte högt bland marknadskraven. Dessa funktioner är ej nödvändiga heller att uppfyllas för att huvudfunktionen av produkten ska fungera. När funktionerna med dess undergrupper har definierats och kopplingen mellan dem är kartlagd kan det liknas vid ett funktionsträd, se figur 5 nedan (Bark, 2009) (Ullrich & Eppinger, 2012).



Figur 5 – Funktionsträd: En schematisk bild på hur en funktionsanalys kan se ut (Bark, 2009)

4.1.1. Kravspecifikation

Kravspecifikation används som verktyg för att kartlägga de krav som marknaden ställer på produkten. Detta är ett avgörande dokument som har stor betydelse för hela utvecklingsarbetet. Metoder för att samla informationen för marknadskraven kan variera. Poängen med detta verktyg är att samla de varierande kraven och översätta dessa till renodlade produktkrav som är mätbara (Bark, 2009) (Ullrich & Eppinger, 2012)

4.1.2. DFX

DFX är ett tankeverktyg för att se över och säkerställa att designen på produkten möter utvecklingsaspekter som är lätt att i många avseende förbise och inte tänker på under utvecklingsfasen. En sådan förbisedd aspekt kan göra att produkten inte går att genomföra. Exempelvis om en konstruktör utveckling konstruktion som ej går att tillverka och då har ej undersökt hela tillverkningsprocessen. DFX är ett tre bokstävers akronym som står för "Design for X" där X:et står för en varierande bokstav beroende på vilken aspekt eller perspektiv som studeras. Exempelvis DFE som står för "Design for Environment" vilket innebär att studera miljöpåverkan av produkten genom att exempelvis göra en livscykelanalys. DFX kan således fungera som en checklista för att se över de flesta utvecklingsaspekterna som är lätta att förbise vid utveckling av en produkt såsom kostnad, tillverkning, miljöpåverkan med mera (Ullman, 2010).

4.1.3. DFA

DFA står för "Design for assembly" som är en av grenarna till DFX verktyget. Fokus med DFA är att studera produkten från monterings- och sammanställningsperspektiv. Målet är att få en så enkel produkt som möjligt att monteras ihop. Det är dock svårt att mäta monteringsenkelhet men DFA använder sig av olika riktlinjer som förespråkas och kan användas för att monteringen ska gå snabbare och gå rätt till samt spara kostnader. På detta sätt ska en generell bild av monteringsenkelhet uppnås. Dessa riktlinjer är:

- Minimera antalet detaljer
- Minimera antalet unika fästelement
- Designa produkten med en baskomponent som andra komponenter fäster mot
- Baskomponenten ska inte förflytta sig under montering
- Försök effektivisera sammanställningen genom att hitta minst antal steg att montera ihop produkten
- Undvik monteringsmetoder som är svåra att göra bakvänt eller återanvända (exempelvis knytning)
- Designa produkten med tanke på vem eller vad som ska montera ihop produkten
- Designa produkter som är symmetriska
- Se till att använda sig av fasningar och styrningar för att underlätta införande och inriktningar av detaljer

Detta är riktlinjer som går att följa och ta tills sig olika mycket beroende på vad det är som designas och ska monteras (Ullman, 2010).

4.1.4. DFM

DFM står för "Design for manufacture" och innebär att utvärdera en produkt mot tillverkningsaspekten. Huvudsyftet är att säkerställa att det går att tillverka och om möjligt även optimera produkten för att minska produktionskostnaderna. För att säkerställa att produkten går att tillverka innebär det ofta en dialog med tillverkare eller experter inom tillverkningsteknik. Genom att ändra detaljen och komponentens form går det att anpassa produkten efter tillverkningsteknik. Optimering av tillverkning innebär att hitta en metod som tillför så lite moment som möjligt, så lite efterbearbetning som möjligt och så lite spill som möjligt (Ullman, 2010).

4.2. Robotsystemet

4.2.1. Industrirobot IRB-4600

Industriroboten IRB-4600 är utvecklad av ABB och är en lämplig robot för olika typer av montering. Den är utvecklad för att ha lång räckvidd jämfört med andra industrirobotar och hög flexibilitet då den erhåller 6-axlar att jobba med och kan monteras vertikalt, horisontellt och upp och ner. Roboten kan lyfta upp till 60 kg och väger 435 kg och är således den kraftigaste industriroboten som kan monteras på både tak, väggar och golv (ABB, 2018). Figur 6 nedan visar roboten:



Figur 6 - Robotmodell: IRB 4600 (ABB, 2008)

4.2.2. Drivsystem

För att driva en eller flera industrirobotar som körs i samma system krävs ett tillhörande drivsystem eller även kallat styrsystem. Detta drivsystem kan ses som hjärnan som håller koll på rörelseteknologin för robotarna. Till ett tillhörande drivsystem går det även att koppla in flera drivmoduler och rörelseenheter för att bygga ett stort robotsystem med flera robotar och drivandemoduler (ABB, 2018).

4.2.3. Robotssystem inom byggindustrin

Automation innebär kort att antingen en process, teknik eller metod blir automatiserad och på så sätt reducerar mänskligt arbete (technopedia, 2018).

Automation är ett ämne som har vuxit kraftigt och implementerats med växande fart inom flertalet olika produktionssystem. Dock har genomslaget av automation inte haft en världsomfattande förverkligande inom byggbranschen. Detta är något som är på framfart och det finns incitament till att utveckla detta men att det finns i dagsläget väldigt lite automation inom byggbranschen men det är något som ses ändras på i framtiden. (Pan, Linner, Pan, Cheng, & Bock, 2018)

4.2.4. Mobile factory

Ett förflyttningsbart produktionssystem även kallat mobile factory är ett produktionssystem eller minifabrik som med rimliga medel kan förflytta sig till olika platser för att agera som en produktion nära förbrukningen av varan som tillverkas. Erwin Rauch beskriver konceptet för

dess transporter fabrika i artikeln Mobile Factory Network (MFN) – Network of Flexible and Agile Manufacturing Systems in the Construction Industry då de än så länge bara är ett koncept. Detta koncept av mobila fabriker dras slutsatsen av att byggbranschen skulle ha extrem nytta av dessa då det är en bransch präglad av höga logistik kostnader. De höga logistiska kostnaderna skulle kunna minskas med hjälp av att skipa prefabricerade tillverkningar som måste skicka delar till en tillverkningsplats. Några av de fördelar han menar på att en mobil fabrik skulle ha för byggindustrin följande:

- Slippa lång distans mellan där prefabricerade bitar tillverkas och byggplatsen
- Rationell förkortning av tillverkningskedjan
- Bidra till mer kontroll över tillverkade detaljer och på så sätt ha en mer kvalitativ leverans av byggämnen
- Förbise transport som är omöjlig eller väldigt svår av stora, tunga, komplicerade byggnadsmoduler
- Lättare att anpassa detaljerna om de är nära byggplatsen
- Behöver inte bygga upp onödigt lager av prefabricerade bitar utan tillverkning kan ske på beställning
- Kan anpassas lättare efter hur bygget går
- Delarna anses kunna vara lättare att levereras ”just-in-time” och på så sätt effektivisera bygget genom att minska väntetider eller bygga upp lager.

En så länge beskrivs dessa mobila fabriker enbart som ett koncept och inget exempel från verkligheten. Rauch menar dock på att ISO-Containrar kan vara ett lämpligt verktyg att använda sig av för att göra fabriken transporterbar. (Rauch, Dominik, & Dallasega, 2015)

4.3. Precisionsgrad för CNC-Maskiner

CNC-maskiner är typ av automatiserad processen som kan efterlikna ett autonomt produktionssystem.

CNC står för Computer Numerical Code och en CNC-maskin är alltså en maskin som drivs av NC-kod genererad av en dator. Dessa maskiner är till för att kunna automatisera tillverkningsmetoder med hög precision (Autodesk CAM, 2014).

Centrala begrepp för CNC maskiner är positions precision och repeterbara noggrannhet. Det första begreppet är hur noggrant en maskin kan hitta till en given position och det andra begreppet innebär att hur ofta den kan hitta tillbaka till samma punkt (Kuric, Kosinar, & Cisar, 2012) (Rago, 2011).

Denna precision kan påverkas av en serie av faktorer. Av dessa är de vanligaste:

- Elastisk deformation av maskinen
- Termisk deformation
- Slitage skada på verktygen
- Förvridning och oförutsedd förflyttning av arbetsstycket
- Defekter av geometriskt oregelbunden konstruktion. Med andra ord en dålig konstruktion.
- Självsvängning i det tekniska systemet

Det påpekas även på att ju större en konstruktion är desto svårare blir det att upprätthålla precisionen och den repeterbara noggrannheten (Kuric, Kosinar, & Cisar, 2012) (Rago, 2011).

Även om precisionen är väldigt viktigt är den svår att mäta hur noggrann en maskin är. Ett par av metoder för att mäta är att använda sensorer inom det tekniska systemet, Ett annat sätt är att använda en mätlocka och ett tredje sätt är att använda sig av ett mätlaser instrument (Olexa, 2005)

4.4. Totalstation och tracker

Totalstationer och trackers är portabla mätinstrument som används för att mäta in konstruktioner. De fungerar som så att de mäter in mot en reflektor eller prisma för att få dess position med en mycket hög precision. Dessa mätutrustning ger alltså väldigt hög flexibilitet för att mäta in positionen för olika typer av konstruktioner (Hedin, 2018).

4.5. Najning och tillverkning av armeringskorgar

I alla typer av betongkonstruktioner finns någon form av armering. Det vanliga sättet att armera i dagsläget är med hjälp av stål och syftet med armeringen är att förstärka betongkonstruktionens hållfasthetsegenskaper. Betongkonstruktioner byggs upp såsom att armeringskonstruktionen tillverkas först och sedan gjuts betongen runt det (BE group, 2012).

Hur armeringskonstruktionen kan se ut varierar lite olika men de benämns som korgar och består av seghärdad stål som bindssamman med hjälp av olika tekniker. Det finns två primära tekniker idag som används för att binda ihop och skapa dessa armeringsnät. Denna metoden är att de svetsas ihop. En annan metod är att så kallat naja ihop armeringen. Det innebär att använda sig av ståltråd och knyta ihop armeringen vid knutpunkter och på så sätt bygga upp en korg (SBUF & Skanska, 2012). Figur 7 och 8 nedan visar en armerings korg och en najningspunkt.



Figur 7. Armeringskorg (Celsa-group)



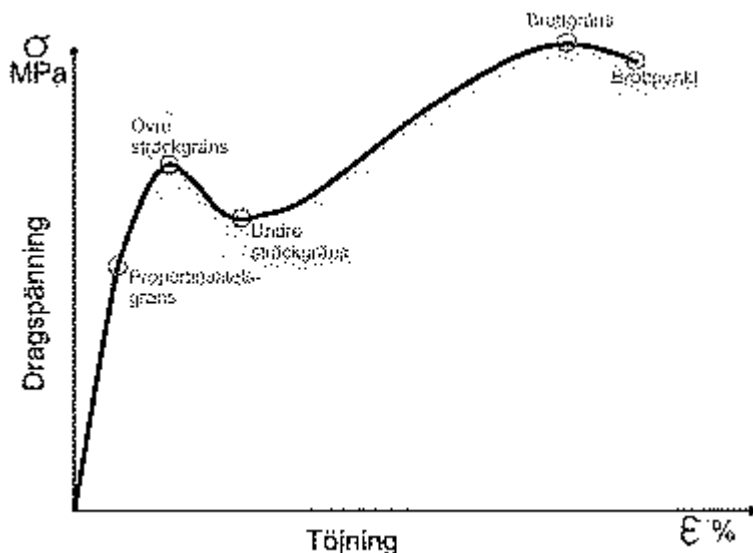
Figur 8. Najningspunkter vid en armeringskorg (Spiksäkert, 2010)

4.6. Hållfasthet

Hållfastheten för en konstruktion beror på den geometriska utformningen av konstruktionen och materialegenskaperna hos materialet.

4.6.1. Materialegenskaper

Med materialegenskaper syftar till största del till de mekaniska egenskaperna sträckgräns, brottgräns och Elasticitets-modulen. Dessa mekaniska egenskaper har ett samband som illustreras bäst med en sträckkurva, se figur 9 (Dahlberg, 2001).

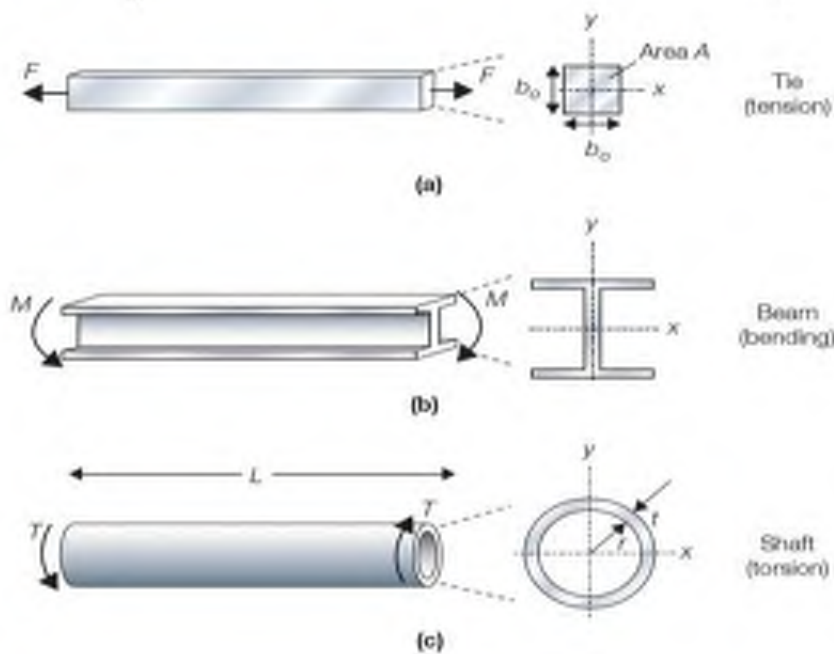


Figur 9 – Sträckkurva (Viebke, 2003).

Sambandet som kurvan illustrerar visar ett materials egenskap att ta upp last. Töjningen på X-axeln visar hur materialet formändras från sitt ursprungsläge medan dragspänning på Y-axeln visar hur spänningen stiger i materialet när de formändras. Den övre sträckgränsen visar gränsen för då materialet plastiskt deformeras och efter denna formändring ej kan återgå till sin ursprungliga form. Innan denna punkt befinner sig materialet i den så kallade elastiska området där deformation på materialet kan ske och materialet återgår till sin ursprungsform. Brottgränsen visar när materialet går sönder. Deltat på grafen som befinner sig i det elastiska området kallas för E-modulen som beskriver ett materials benägenhet att formändras och deformeras (Dahlberg, 2001) (Viebke, 2003).

4.6.2. Geometrisk utformning

Den geometriska utformningen av en konstruktion spelar även roll för dess hållfasthet. Den geometriska egenskapen brukar även kallas för formfaktorn. Hur formfaktorn påverkar konstruktionen beror på hur lastfallet ser ut som konstruktionen tar upp. Olika utformningar tar upp laster på olika sett. Det strävas efter att göra en utformning som använder så lite material som möjligt. Detta brukar betecknas som en optimal konstruktion då så lite material har använts för att ta upp lasten. Detta benämns även som lättviktskonstruktion då förhållandet mellan vikt och lastupptagningsförmåga är så lite som möjligt. Som riktlinjer för optimal utformning finns det klassiska utformningar för de vanligaste lastfallen, se figur 10 (Carlsson J., 2015).



Figur 10 - Optimal utformning för vanliga lastfall (Carlsson J. , 2015)

De figuren ovan visar är kort beskrivet följande:

- (a) Drag – fungerar ett massivt tvärsnitt
- (b) Böjmoment – använd ett tunt liv i mitten och tjocka flänsar vid toppen och botten
- (c) Vridmoment – tunnväggigt rör är den optimala utformningen.

Det som utgör formfaktorn och är intressant är utformningen för tvärsnittet. Dessa är optimala med avseende på att de tar upp lasten på bäst sätt och sparar mest material vid denna typ av utformning (Carlsson J. , 2015).

4.6.3. FEM-Analyser

Finita Element Metoden som förkortat blir FEM är ett datorbaserat analysverktyg för att studera fysikaliska element. Analysverktyget bygger på att skapa en beräkningsmodell som sedan delas upp i mindre delar, så kallade finita element. Dessa uppdelade element beräknas sen med numeriska lösningar av partiella matematiska ekvationer inom fysik och teknik. När alla element är beräknade skapas en simulering av hela beräkningsfallet som sattes i början. Med hjälp av denna metod går det att simulera komplicerade fysikaliska fenomen som kan vara tidskrävande med andra konventionella metoder (Nationalencyklopedin, 2018).

5. Tillämpad lösningsmetodik

Detta avsnitt behandlar hur fallstudien har genomförts. Kapitlet beskriver hur teorin har tillämpats om produktutvecklingsmetodiken för att nå ett resultat.

5.1. Projektplanering

Projektet planerades inom tidsramen för 20 veckor som är den avgränsande tiden för ett examensarbete. Målsättningen var att nå så långt som möjligt mot en färdig produkt. Detta gav en stor flexibilitet i början då målsättningen saknade tydliga mål och var relativt flytande till en början. Det gjorde att en del faser som planerades in till en början ej behövdes göras medan andra faser tog längre tid resulterande i att utfall av hur arbetet gjordes ej stämde överens alla gånger med hur det planerades från början. Planeringen över de aktiviteter som skulle genomföras dokumenterades i ett Gantt-schema, se bilaga 2.

5.2. Problemförståelse

5.2.1. Intervjuer

Inledningsvis för att förstå problemet gjordes intervjuer mot robotdalen som agera beställare av projektet. De gav tillräckligt med information för att förstå de övergripande problemet. Detta skedde i form av diskussion tidigt i projektets uppstart.

Till en början räckte det att ha en dialog mot robotdalen för att förstå problemet, men under projektets gång har andra parter varit tvunget att kontaktas för att ta reda på mer information. Intervjuer har således skett löpande mot flera olika parter där de kan ha skiljt sig ifrån att vara långa och utrymme för flera frågor har funnits till att vara väldigt korta där syftet har varit att få svar på en specifik fråga eller ett specifikt problem. Intervjuer har skett i form av dialog, telefonsamtal och mejlkonversationer.

Upplägget för alla intervjuer har varit semi-strukturerade eller ostrukturerade. De längre intervjuerna har utgått ifrån diskussionspunkter som de har frågats runt. Anledning för denna struktur av intervjuer är i och med att detta är ett ämne som bygger på att studera något nytt och studera hur det kan se ut bygger det på att skaffa sig nya insikter har då varit svårt i processen veta exakt vilka frågor som ska ställas på förhand. I och med att projektet även präglas av många variabler som påverkar varandra är det även svårt att formulera en fråga där ett direkt svar kan ges. Därför sågs det hellre att intervjuerna grundar sig i diskussioner och möten där det går att diskutera runt frågorna.

5.2.2. Omvärldsanalys

En omvärldsanalys över området skedde genom att använda sig av olika källor. Det bestod av litteratur inom givna områden och sökning på internet. Till en början användes en omvärldsanalys för att studera hur robotar arbetar och tillvägagångssätt för att arbeta med konstruktioner av större karaktär. En stor del av analysen i början fokuserade även på att studera olika typer av kranbalkssystem och liknande användningsområden för att skapa sig en förståelse kring ämnet.

Under hela projektets har en kontinuerlig omvärldsanalys skett och rådfrågning kring problemområdet har tagits till som metod för att lösa uppstådda problem. De har således kontinuerligt samlats in data vid behov. Därmed är resultatet av omvärldsanalysen utspridd över de aktuella delarna där de har påverkat arbetet.

5.2.3. Marknadskrav

Den data som samlades in tidigt i projektet samlades in som marknadskrav för vad denna automationsstation ska kunna klara av. Kravställarna för marknadskraven benämns som projektdirektiv då det är direktiv inom det stora projektet som ställer kraven på produkten, det är alltså en blandning av de krav som Skanska, Robotdalen och övriga intressenter inom projektet ställer. Se tabell 2 nedan för marknadskrav.

Tabell 2 - Marknadskrav

Krav:	Kravställare
Kunna vara transporterbar	Projektdirektiv
Kunna vara modulbaserad	Projektdirektiv
Tillräckligt Styv	Projektdirektiv
Vara tillräckligt stor för korgarna	Projektdirektiv
Skapa utrymme för kablagedragningen	Projektdirektiv
Utrymme för öppning av hämtning för armeringsjärn	Projektdirektiv
Jämn drivning	Projektdirektiv

Dessa marknads krav som har angivits är önskemål som automationsstationen ska kunna uppfylla men med avseende på de fokus och avgränsningar som har angivits i projektet, se tidigare avsnitt avgränsningar och projektdirektiv.

5.2.4. Funktionsanalys

Marknadskraven analyserades vidare och det uppställdes en funktionsanalys som beskriver hur konstruktionen ska fungera för att uppnå marknadskraven. Funktionsanalysen ger en överskådlig bild över vad konstruktionen ska göra och vad som krävs för att uppfylla sitt syfte, se bilaga 3.

5.2.5. Kravspecifikation

Då en grundläggande förståelse av problemet hade uppnåtts upprättades en kravspecifikation som bygger på funktionsanalysen och marknadskraven, se tabell 3. Kravspecifikationen är resultatet av problemförståelsen och resterande arbete bygger på denna specifikation.

Tabell 3 - Kravspecifikation

Krav	Mål	Godkänt	Enhet	Rational
Ska kunna möjliggöra ett arbetsutrymme som är tillräckligt stort för en armeringskorg och 3 robotar	20 x 12 x 6	20 x 10 x 4	m	Projektdirektiv
Stationen ska kunna använda sig av x antal industri robotar	3	3	st	Projektdirektiv
Ska kunna använda de flexibla kabellängderna som ABB:s drivsystem kan arbeta med	Ja	Ja	Positivt/ Negativt	Projektdirektiv
Drivsystemet för stationen ska använda sig av ABB:s drivsystem	Ja	Ja	Positivt/ Negativt	Projektdirektiv
De modulära komponent delarna till stationen får inte vara större än hänvisade mått	11700 x 2250 x 2200	11700 x 2250 x 2200	mm	För att få plats i en 40 fots-container
Måste uppge repeterbarhet med noggrannhet av x mm	ej fastställt	ej fastställt	mm	Projektdirektiv
Ska kunna medge rörelser för robotarna i x-antal rörelsedimensioner	3	3	st	Projektdirektiv
Ska kunna förflytta robotarna i en viss hastighet	0,5	< 0,5	m/s	Rekommenderad hastighet
Ska kunna monteras ihop på x antal dagar	2	3	Antal	Projektdirektiv
Ska kunna få plats i en tälthall	Ja	Ja	Positivt/ Negativt	Projektdirektiv
Ska kunna gå att montera på en betongplatta	Ja	Ja	Positivt/ Negativt	Projektdirektiv
Ska kunna ge utrymme för att en bockningsstation och tillförsel av armeringsjärn ska kunna stå vid sidan	ej fastställt	ej fastställt	mm	Projektdirektiv
Ska ej använda sig av några fasta förband	Ja	Ja	Positivt/ Negativt	Tillkommer för monterbarhetens skull
Robotarna ska kunna röra sig oberoende av varandra i X-Y och Z-led	Ja	Till så stor grad att de mekaniska delarna ej krockar med varandra	Positivt/ Negativt	Projektdirektiv

I kravspecifikationen finns en del krav som ej är fastställda hur stort värde som ska uppnås för att uppfylla kravet. Dock har dessa krav tagits i speciellt beaktande och diskuterats mot kravställare och branschfolk för att se om de är rimligt och att de antagligen kommer att uppfylla önskvärd funktion.

Det ena kravet som ej är fastställt är hur stort utrymme för bockningsstationen som ska ges. Detta är svårt att säga eftersom hur bockningsstationen ska komma att se ut är det ingen som vet. Det är än så länge på ett konceptuellt bas. Dock finns det en konsensus inom projektgruppen att om det går att bygga en automationsstation som uppfyller det första kravet och en sida håls fri ska det vara möjligt att bygga en bockningsstation för denna konstruktion. Därmed har kravet för bockningsstation behandlats på det viset att en sida ska hålas fri och att det utrymmet anses vara tillräckligt.

5.2.6. Precisions grad

Det andra kravet som ej är fastställt är precisionsgraden för hur noggrann robotarna måste använda sig av. Detta är som sagt svårt att fastställa då det beror som tidigare nämnt på väldigt många olika variabler. Utifrån föregående kapitel som beskriver precisions grad för CNC-Maskiner i avsnitt 4.3 så var bland annat dessa punkter omnämnda som faktorer som spelar roll för precisionsgraden.

- Elastisk deformation av maskinen
- Termisk deformation
- Slitage skada på verktygen
- Förvridning och oförutsedd förflyttning av arbetsstycket
- Defekter av geometriskt oregelbunden konstruktion. Med andra ord en ojämn och oprecis konstruktion.
- Självsvängning i det tekniska systemet

Andra faktorer som spelar stor roll över precisionsgraden är utformningen på verktyget som roboten använder och typ av robot. Alla dessa system inverkar på precisionsgraden och repeterbara noggrannheten på olika sätt. I och med att detta är en konstruktion av ett nytt slag är det även svårt att hitta adekvat data att grunda sig i som ger ett bestämt värde för precisionsgraden.

Detta är ett problem för detta arbete då det är svårt att sätta ett värde för detta men det anknyter till stor del även till själva kärnan av arbetet. Att undersöka hur denna konstruktion kan se ut då det är svårt att säga exakt värde. Precisions graden behandlas därmed mer istället för att undersöka hur fin precision som krävs vänds det snarare till att bli hur fin precisions grad går att uppnå med angivna avgränsningarna.

Det system som anses har störst inverkan på hur väl precisions graden för konstruktionen är styrningar för systemet. Styrningarna uppgift i systemet är till för att vara den komponent som medger rörelseriktningen och ju mer oprecis styrning som använts desto ojämnare blir körningarna.

Hur fin precisionsgrad som går att uppnå kommer således grunda sig i valet av styrningar och vilken typ som går att använda. Därmed kommer faktorerna elastisk deformation och termisk deformation vara beräknade efter de styrningarna som väljs för systemet.

Vilken typ av verktyg och slitage på verktyg kommer ej tas i beaktande då det är angivet i avgränsningar att det är inget som kommer ta till större beaktande i detta arbete.

Faktorn för defekter av geometrisk oregelbunden konstruktion anspelar på vilka konstruktionsförutsättningar som påverkar valet av styrning. Exempel på faktorer som spelar roll för geometrisk oregelbundenhet är skarvar och tillverkningsprecisionen för detaljerna. Hur väl detta genomförs påverkar således valet av styrningar och vilket styrningssystem som är möjligt att använda.

Detta är även en stor anledning varför arbetsläget och transportläget för konstruktionen skiljer sig emot varandra. Då arbetsläget vilka minska geometrisk ojämnhet men transportläget kräver då att det ska finnas skarvar och grova toleranser.

Faktorn för förvridning och oförutsedd förflyttning är omöjlig att mäta förens efter det finns en färdig konstruktion. En självklar del i utvecklingen av konstruktionen är att ta i beaktande att konstruktionen ska kunna röra sig som ämnat att göra.

Självsvängning av systemet är tyvärr en faktor som ej kommer kunna studeras för detta arbete. Detta är för att delvis så har det med en tidsbrist att göra, dels saknades kompetens för beräkningar inom detta område och delvis saknades även resurser för studien att skaffa de verktyg och programvaror för att analysera detta som ger adekvat data. Även självsvängning i sig är en faktor som beror på många faktorer: Exempelvis typ av drivsystem, styrningar, utformningen av övergripande konstruktionen, robotar etc. Detta gör att det är enormt tidskrävande. Denna punkt har återigen tagits upp i kapitlet för slutsats och diskussion.

Sammanfattat så är precisionsgraden svår att sätta ett krav på. Arbetet kommer att försöka studera hur fin precisionsgrad som går att uppnå med de avgränsningar som har satts. Den primära faktorn som kommer bestämma hur fin precisionsgraden blir är vilka styrningar som väljs.

5.2.7. Konstruktionsuppdelning

För att underlätta överblicken av produkten gjordes en uppdelning av olika konstruktionsdelar som studerades var för sig och hur de skulle integrera med varandra för att när de är ihopsatta uppnå kraven i kravspecifikationen. Dessa delar ansågs nödvändiga för att konstruktionen skulle fungera. Konstruktionsdelarna blev följande:

- **Robotsystem**
Vilken typ av robot som ska användas för konstruktionen
- **Övergripande ramverk**
Vilken typ av kransystem som ska användas samt hur ramverket med tillhörande balkar ska utformas
- **Styrning**
Vilken typ av styrning som ska användas som medger rörelser i X- Y- och Z-led
- **Inpassning**
Olika typer av inpassningar som kan användas för att montera ihop konstruktionen lättare
- **Drivning**
Vilken typ av drivning som ska användas till tillhörande robotsystem. Det innebär att studera effekten på motorer, tillhörande växellåda och varianter att driva systemet.
- **Inmätning**
Vissa delar bör mätas in för att uppnå rätt montering, här studerades hur denna inmätning bör gå till för konstruktionen ska möta kraven.
- **Fogar och ihopsättning**
Hur utformningen av fogar kan se ut för att uppnå monteringskraven och monteringsmöjligheter.

- **Kabeldragning**

Vilka typer av kablar som ska användas och hur kabeldragningen kan se ut för systemet. Här studerades till största del signalkablarna och de nödvändiga kablarna som används i ABB:s drivsystem.

5.3. Konceptgenerering

Konceptgenereringen skedde för var och en av de konstruktionsuppdelningarna som hade upprättats i föregående avsnitt.

5.3.1. Robotsystem

Valet för variant av industrirobot var ett av de första momenten som skedde i arbetet då frihetsgraderna för vad som är möjligt ej var särskilt många. Till en början ska roboten som används vara möjlig att montera på ett sådant sätt att det ska finnas möjlighet att transportera den genom systemet. Det innebär att det ska vara möjligt att montera den på en vägg eller upp och ner. Det ska också vara en robot från ABB enligt projektets riktlinjer. För att kunna arbeta med att montera ihop armeringsburar krävs även en stark robot.

Enligt Lars Petterson ska denna automationsstation klara att bygga armeringskorgar som använder sig av armeringsjärn av diametern upp till 25 mm. Tabell 4 visar data över armeringsstål där det går att läsa ut hur mycket det väger. Data i tabell 4 är hämtad från BE Group.

Armeringskorgarna ska vara 12 x 8 x 4 meter stora. Med den data går det att ta antagandet att det tyngsta armerings järnet som roboten kommer att bära är ett 25 mm i diameter armeringsstål som är 12 meter långt. Detta går att avläsa från tabellen väger 46,2 kg. Roboten ska alltså klara att jobba med en sådan last exklusive vikten från verktygen (Petterson, 2018).

Tabell 4 - Data för armeringsstål (Begrupp, 2012)

Diameter mm	Lagervara (X)			Vikt kg/meter
	12 meter	6 meter	2 meter	
6		X		0,222
8	X	X	X	0,395
10	X	X	X	0,617
12	X	X	X	0,888
16	X	X	X	1,580
20	X	X		2,470
25	X			3,850
32	X			6,310

Med denna data begränsar det valet av robotar till modell IRB-4600. Detta är för att Robotmodellen som är i lastklassen under IRB-4600 ej kan lyfta mer än 20 kg och robotklassen som befinner sig över IRB-4600 ej kan monteras på sådant sätt att det går att förflytta den med den mobilitet som krävs.

IRB-4600 kan lyfta 60 kg, se teorikapitlet avsnitt 4.2.1. för mer data för denna robot. Detta ger marginal till att lyfta stänger som är aningen längre än 12 meter men det är beroende på vikten för verktyget. En av anledningarna till att stationen ska kunna jobba med tre robotar är även för att det ska vara möjligt att använda sig av flera robotar för att lyfta en typ av järn. Vilket ger ytterligare marginal till att lyfta tyngre stänger.

Valet av industrirobot behövdes således inte gå igenom några fler faser i och med att kraven och anvisningarna var såpass begränsande att det sållades ner till ett alternativ att jobba med.

5.3.2. Övergripande kransystem

Att se över det övergripande kransystemet har studerats olika koncept att utforma ramverket som utgör automationsstationen. Via brainstorming och diskussion med projektgruppen utformades olika typer av system för hur den övergripande strukturen skulle se ut. Under denna process tillkom även avgränsningen att inte fokusera allt för mycket på hur armeringsjärnen skulle placeras på marken samt önskemålet att robotarna ska kunna röra sig oberoende av varandra.

Primärt studerades två koncept. Utifrån omvärldsanalysen var de koncepten de mest framstående. En lösning är att ställa upp åkbanesystemet för robotar är att utforma systemet som en Gantry. Detta system låter robotarna hänga i en axel som kan röra sig i alla tre rörelseriktningar. Detta visas i figur 11. Det andra konceptet bygger på att en större del av ställningen rör sig med marken. Det liknar stora portal som förflyttar sig, se figur 12.



Figur 11. Gantry-system (AZoRobotics, 2018)



Figur 12. Portalkonstruktion (Andon Robotics, 2018)

Detta ledde till de två koncepten för övergripande kransystemen som arbetades primärt med blev:

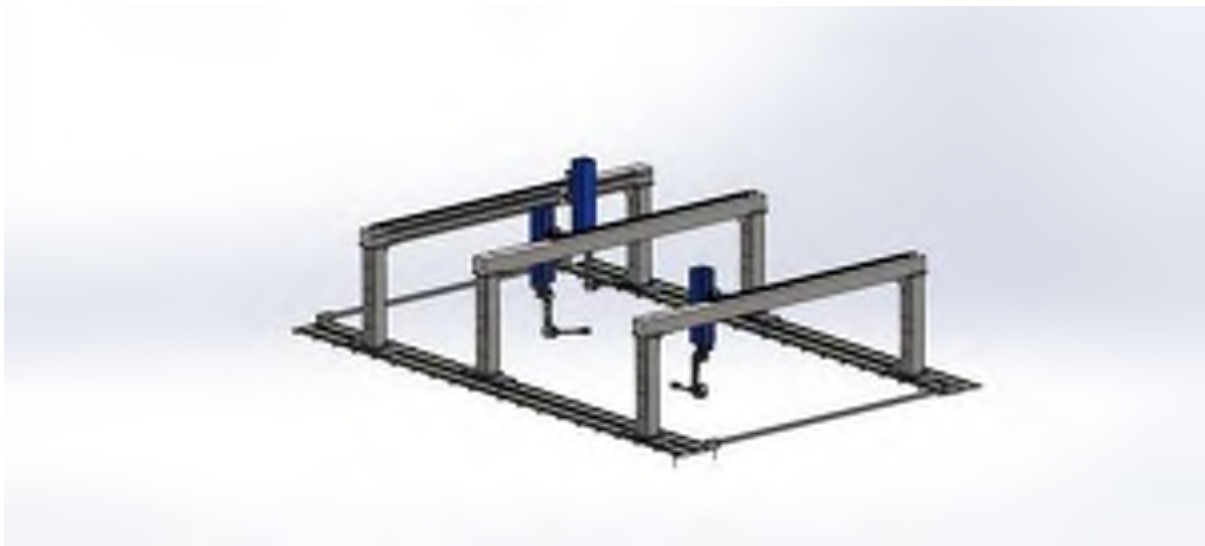
Koncept 1 - Gantry:



Figur 13 - Koncept 1 - Gantry

Figur 13 ovan visar Koncept 1 även kallat gantry:n som är baserat på ett ramverk där robotarna transporteras av traversbalkar och är luftburna. Detta koncept bygger på att drivning och styrning är ovanpå ramstrukturen. Detta koncept liknar även det konceptet som har testats i mindre skala och grundar sig även i de konceptuella tankarna för hur automationsstationen ska arbeta ifrån det arbete som har gjort tidigare i projektet.

Koncept 2 – Portalsystemet:



Figur 14 - Koncept 2 - portal

Figur 14 illustrerar koncept 2 som kallats för portalsystemet. Konceptet bygger på att drivningen och styrningen för den långa leden förflyttas till marken. Istället byggs även portaler som förflyttar sig snarare än traversbalkar som förflyttar sig.

Båda koncepten presenterar lösningar för hur robotarna kan förflytta sig i alla tre led och kan alltså befinna sig i alla positioner för ett rum. När koncepten hade tagits fram blev de olika rörelseriktningarna benämnda följande:

- Höjddled: Z-Led
- Långsträckan: Y- Led
- Kortsträckan: X-Led

Båda koncepten var svåra att avgöra på än gång vilket som passade bäst. Detta innebär att både koncepten togs vidare till konceptutvärderingsfasen. För att avgöra vilket koncept som passar bäst behövdes noggrannare beräkningar för de kritiska lastfallen samt undersöka de övriga konstruktionsdelarna.

5.3.3. Styrning

Systemet som för styrning är som tidigare nämnt väldigt viktig för precisionsgraden. Inom projektet diskuterades mycket vilket system lämpade sig. Det studerades även väldigt omfattande efter olika befintliga lösningar för styrningssystem som finns idag. Detta gjordes genom omvärldsanalys på internet, studerades alternativ från olika mekanik leverantörer och fördes dialog med Andon Robotics, SKF och projektmedlemmar från Robotdalen över vilket alternativ av styrning som lämpade sig bäst. Utifrån detta formades tre koncept.

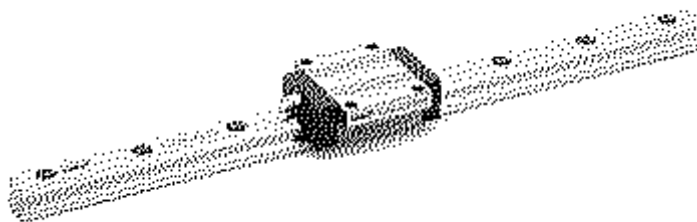
Koncept 1 – kättingtelfern



Figur 15 - koncept 1 - styrning för kättingtelfern (PMH, u.d.)

Detta koncept som visas i figur 15 är ett vanligt sätt att medge rörelser för traverskranar. Det består av ett löphjul som ligger an mot en fläns på traversbalken. Dessa löphjul medger rörelsen för att detaljen som ska transportera sig.

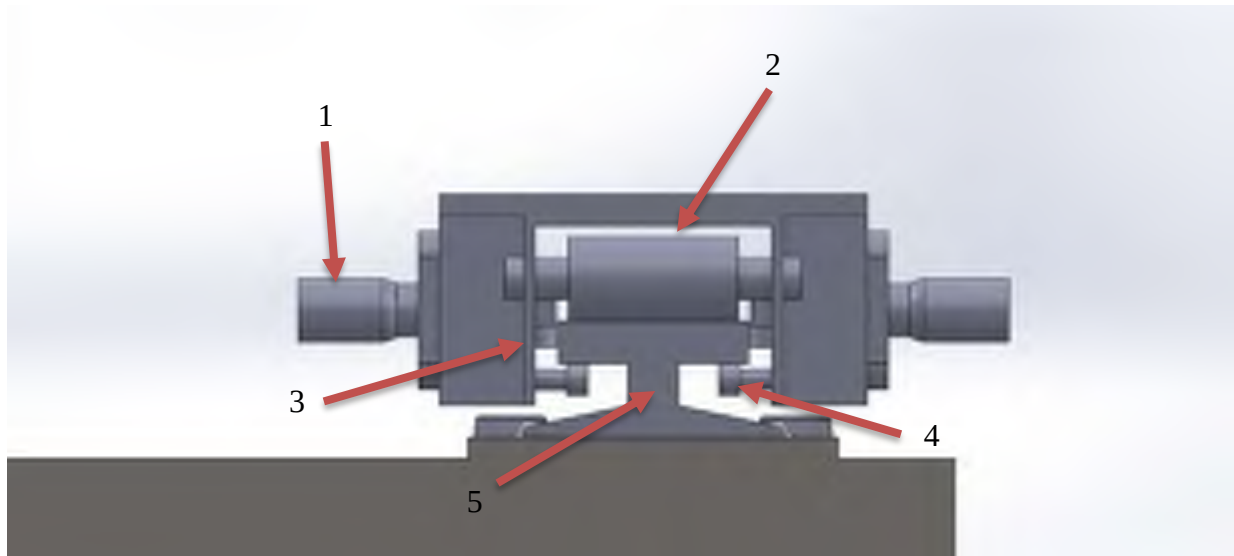
Koncept 2 - Linjär styrning



Figur 16 – Koncept 9: linjär styrning (SKF, u.d.)

Figur 16 visar ett koncept där linjär styrning används. Linjärstyrningar kännetecknas av att de erhåller mycket fin precision för linjära rörelser. De består av en vagga och en skena som vaggan åker på. Innanför vaggan befinner sig kulor som fungerar som lagerelement för en så jämn operation som möjligt (SKF, u.d.).

Koncept 3 - Bearbetad räls med tilläggande kamrullar och löphjul.



Figur 17 - Koncept 3: Bearbetad räls med kamrullar och löphjul

Detta koncept bygger på att en räls bearbetas och planas på sidorna och med hjälp av kamrullar och löphjul styrs konstruktionen på plats. Detta illustreras i figur 17. Det figur 17 visar är följande:

- 1: Ställskruv
- 2: Löphjul
- 3: Kamrulle
- 4: Stödhjul
- 5: Bearbetad räls

Tanken med detta koncept är att kamrullarna ska styra in konstruktionen då de ligger an mot den bearbetade rälsen. Med hjälp av ställskruvarna ska de kunna ställas in mot kanten av rälsen och spännas in hårdare. Till detta koncept går det även att göra ställskruven fjäderbelastad vilket betyder att den ligger an mot en fjäder. Detta gör att styrningen kan ta emot eventuella avvikelser om så skulle ske. Löphjulet är till för att fungera för att ta upp lasten i den vertikala riktningen och även den ligga an mot en bearbetad yta mot rälsen. Stödhjulen är till för en försäkras att ta upp laster om konstruktionen tippar. Detta koncept har kommit fram via mejlkonversation med SKF och tidigare erfarna konstruktörer inom ämnet (SKF, 2018) (Holst, 2018).

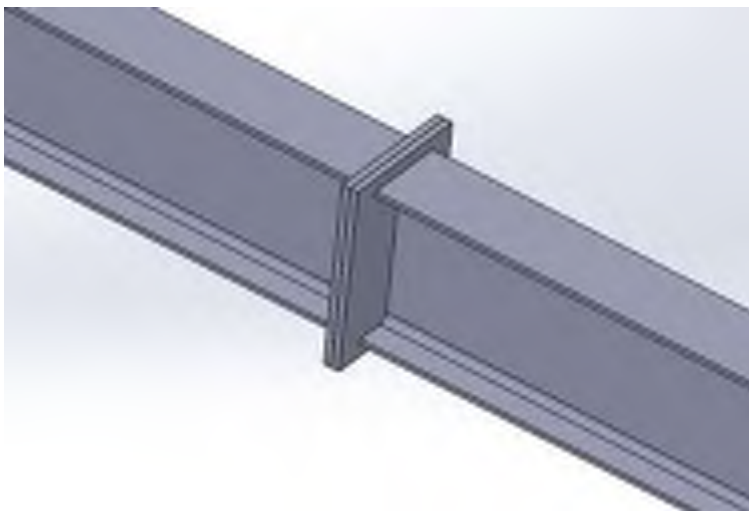
5.3.4. Fogar, Monteringsmöjligheter och Förband

I och med att konstruktionen ska vara möjlig att plocka isär och monteringsvänlig har olika möjligheter att foga ihop konstruktionen studerats. Monteringsvänlighet på plats innebär att det ej går att använda sig av permanenta förband såsom svetsning utan det som konstruktionen har fått förhålla sig till är skruvförband.

Genom att sammanställa information från diskussion med Andon, Structor samt Stålbyggnadsinstitutet detaljhandbok för knutpunkter finns det generellt sett två typer av skruvförband när det kommer till sådan här konstruktioner. Antingen är skruvfläsen utanpåliggande eller befinna sig inom balkens ytterdimensioner för bredd och höjd. Detta är även beroende på balk som används (Andon, 2018) (Structor, 2017) (Stålbyggnadsinstitutet, 2013).

I och med att knutpunkten är beroende på val av balkar och variant av fogning finns väldigt många metoder att foga samman hela denna konstruktion och utforma förbanden. På grund av att tiden och resurserna för genomförandet av detta arbete ej räcker till att studera djupgående alla typer av utformningar av förband har de tagits fram två koncept med anvisningar från med diskussion med Andon och Structor.

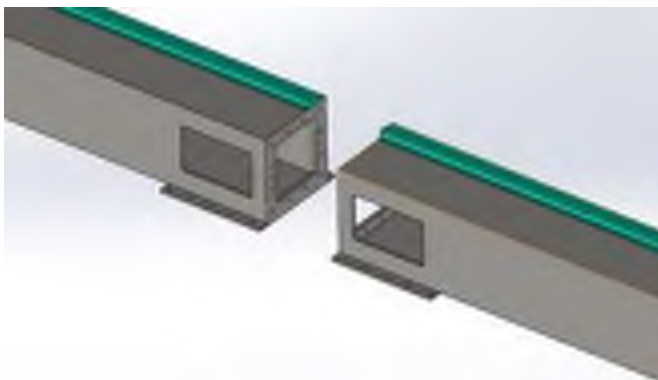
Koncept 1:



Figur 18 - Koncept 1 ihopfogning

Figur 18 visar ett klassiskt sätt att foga ihop 2 balkar. En utanpåliggande fläns där genomgående skruv fästs runt hela fläsen.

Koncept 2:



Figur 19 - Koncept 2 ihopfogning

Koncept 2 av ihopfogning som illustreras i figur 19 visar hur en fogning kan se ut där skruvflänsen är innan för balkdiameterna ytterdiameter. Notera hur det i det här fallet med en fyrkantsprofil måste skäras upp en yta som går att komma in ifrån för att komma åt den genomgående skruven.

Ytterligare rekommendationer som tillkom för utformning av fogning är att försök att använda sig av genomgående skruv till så stor uträkning som möjligt samt att om två balkar ska sammanfogas ska det eftersträvas att ha pelarstöd under skarven om möjligt (Andon, 2018).

5.3.5. Drivning

Till drivning har de kollats på tre primära grupper för att driva systemet. Koncepten som utvecklades togs fram på liknande sätt som konceptutvecklandet av styrsystemet. Detta är i och med att systemen relaterar till varandra och på ett vardagligt uttryckt sätt ”går lite hand i hand med varandra” då det ena systemet driver komponenterna i rörelseriktningen och den andra systemet styrsystemet i rörelseriktningen.

Systemet är låst till att använda sig av motorenheterna som ABB kan erbjuda enligt projektdirektiven. Så drivsystemet måste vara kompatibelt med de motorerna. Dock är detta ofta en leverantörs fråga och de leverantörer som har kontaktats för konceptutvecklingen har metoder att integrera deras drivsystem med en viss typ av motor.

Koncept 1 - kuggstångsdrift



Figur 20 – kuggstångsdrift (Engineering360, u.d.)

I figur 20 visas kuggstångsdrift som går ut på att använda sig av ett kugghjul som är ansluten till en växellåda eller motor som roterar mot en kuggstång. På detta sätt förvandlas en roterande rörelse till en linjär rörelse (Engineering360, u.d.)

Koncept 2 – kulskruv



Figur 21 – kulskruv (Araton AB, u.d.)

Figur 21 visar konceptet för kuls kruvar, även här omvandlas en roterande rörelse till en linjär rörelse. Kuls kruvar fungerar som så att de består av en roterande skruv där lagerelement i form av kulor ligger an emot. När skruven roterar vill kulorna i förflytta sig med rotationen vilket tvingar vaggan som omfamnar kulorna åt en linjär riktning.

Koncept 3 – Remdrift

Att driva systemet med rem bygger på att en drivande rem med räfflor spänns mellan lagerrullar eller lättningar. Den räfflade remmen är sedan kopplad till en drivande del som får remmen att röra på sig. Beroende på hur remmen är spänd resulterar det i att en del som är kopplad till remmens räfflade sida förflyttar sig med remmen. I detta fall ska då den förflyttningsbara delen i remdriften röra sig linjärt.

5.3.6. Inpassning och Instyrning

Då denna konstruktion innehåller många delar som kräver att de sitter på en väldigt noggrann position och att de ska placeras på sin position väldigt snabbt har olika koncept tagits fram för att föra komponenterna i sammanställning in mot rätt plats mot varandra.

Huvudsakliga koncepten för detta har tagits fram med riktlinjer av produktutvecklingsverktyget DFA för att skapa en så enkel montering som möjligt. Den del av DFA som togs i beaktande visas som fetmarkerad i listan nedan.

- Minimera antalet detaljer
- Minimera antalet unika fästelement
- Designa produkten med en baskomponent som andra komponenter fäster mot
- Baskomponenten ska inte förflytta sig under montering
- Försök effektivisera sammanställningen genom att hitta minst antal steg att montera ihop produkten
- Undvik monteringsmetoder som är svåra att göra bakvänt eller återanvända (exempelvis knytning)
- Designa produkten med tanke på vem eller vad som ska montera ihop produkten
- Designa produkter som är symmetriska
- **Se till att använda sig av fasningar och styrningar för att underlätta införande och inriktningar av detaljer**

Koncepten illustreras i figurerna nedan där tanken är att utnyttja fasningar och styrningar för att placera komponenter på rätt plats.

Koncept 1 – Kantfasningar



Figur 22 - instyrning 1.1



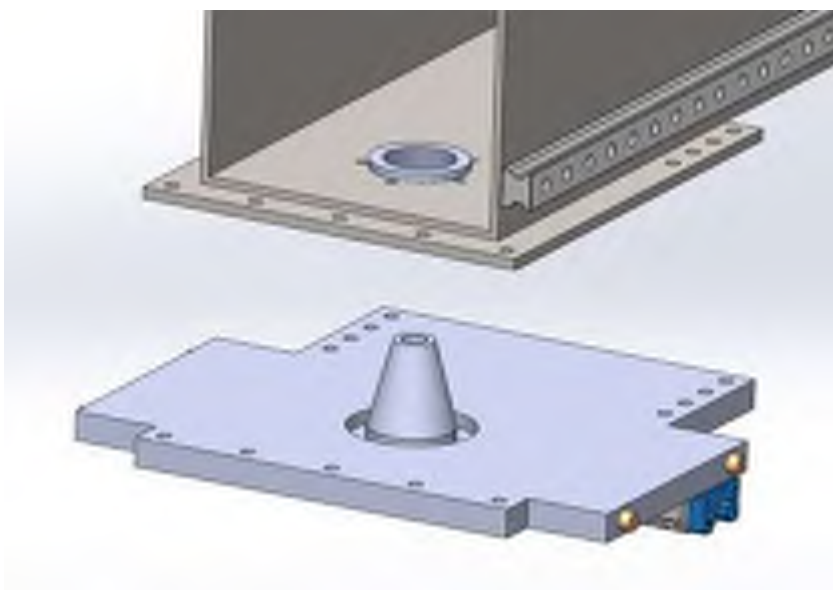
Figur 23 - Instyrning 1

Koncept 1 för infästningar som visas figur 22 och 23 bygger på att bearbetade profiler sätts an mot ytterkanterna av balkarna som ska fogas ihop. De fästes på sidorna av balken och skruvflänsar som finns till förfogande. På detta sätt går det att fästa dit fasningar som kan mätas in under en första montering. Dessa inmätta fästningar som har lagts till kan sedan användas för att styra in detaljer emot.

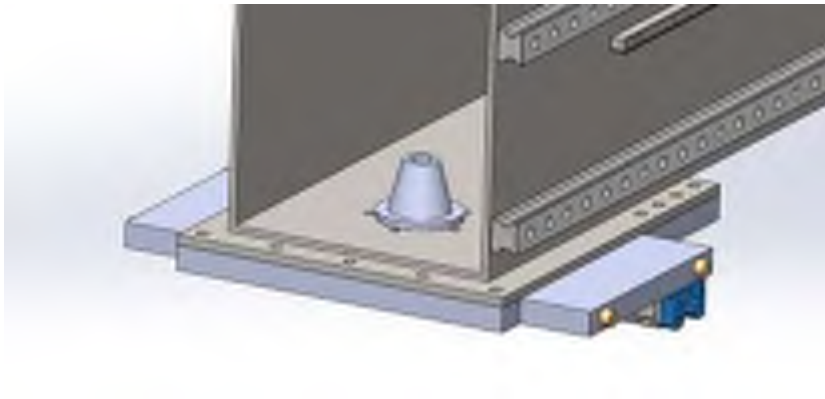
Koncept 2 – Konen

Konceptet konen går ut på att använda sig av en svarvad kona som styr in mot en given fasad negativ kona. Likt föregående koncept är tanken att göra en montering då dessa detaljer kan mätas in för korrekt position. Efter denna förmontering där styrdetaljerna har placerats kommer följande monteringar gå smidigare då styrdetaljerna redan sitter på plats. Notera att den instyrande konan har olika storlek på de 2 första bilderna av konceptet gentemot de 2 efterföljande bilderna av konceptet. Detta är för att illustrera hur en del detalj riktar in sig mot en sida först för att sedan rikta in sig mot den andra. Detta för att inte behöva rikta in sig mot 2 stycken instyrningsdetaljer samtidigt vilket kan bli väldigt jobbigt.

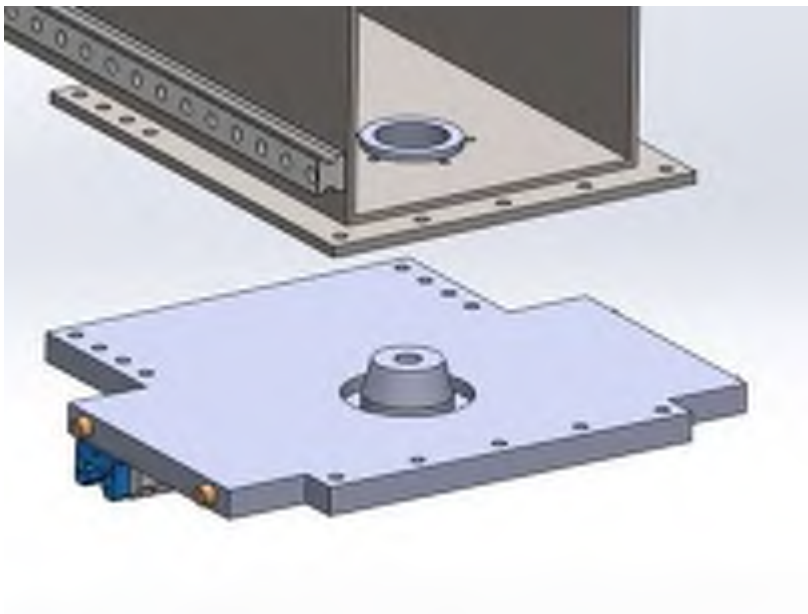
Figurerna 24-27 nedan illustrerar koncept 2.



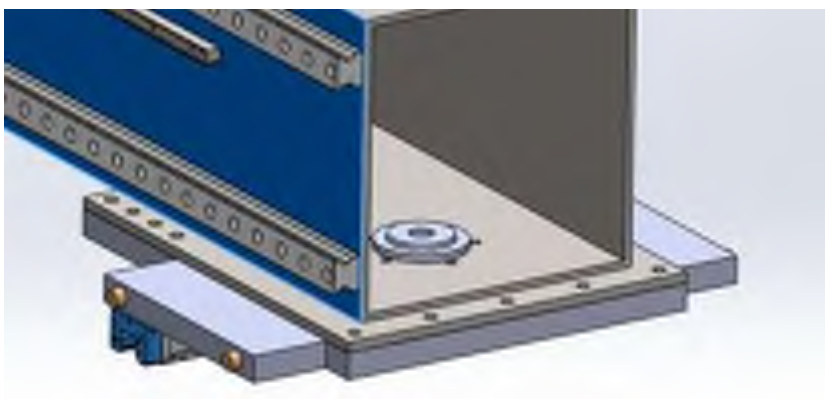
Figur 24 - Instyrning 2.1



Figur 25 - Instyrning 2.2



Figur 26 - Instyrning 2.3



Figur 27 - Instyrning 2.4

5.3.7. Inmätning

Till stor del är tanken med konstruktionen att utnyttja DFA verktyget och har mekanisk instyrning för de flesta detaljerna. På så sätt kommer det gå att slippa mäta in komponenter och spara in på monteringsid.

Dock kommer det dock finnas ett moment som kommer att vara tvunget att mätas in för konstruktionen. Det är placering av de första detaljerna för att få det att skapa ett plan. Under arbetets gång har de försökt att hitta metoder för att slippa en inmätning av konstruktion men ingen lämplig metod har identifierats.

Detta beror på att konstruktionen ska stå på en redan gjuten betongplatta. Detta är en stadig grund men det är svårt att ha någon koll på hur plan betonggrunden är. Detta gör att det ej går att identifiera ett startplan för hur robotarna ska arbeta ifrån. För att skapa ett plan som är rakt är tanken att fästa konstruktionen med justerbara grundbultar i fötterna av konstruktionen. Med dessa grundbultar går det att justera konstruktionen så att den blir plan. Dock är det svårt att veta hur mycket dessa grundbultar ska justeras utan ett mätinstrument. Därför kommer det behöva finnas en mätmetod för att justera in de första detaljerna som ska placeras vid monteringen.

Det identifierades bara ett lämpligt sätt att mäta in de första grunddetaljerna för konstruktionen och det var att använda sig av en tracker eller totalstation som mäter in detaljerna. Detta grundar sig i att i de mätmetoder som beskrevs i teorikapitlet för precision, se avsnitt 4.3 så ansågs det som det enda praktiskt alternativet att arbeta med.

Dock identifierades ett annat möjligt sätt att justera höjden för att skapa ett plan och det var att använda sig av shims för att justera höjden men detta avrådes från att användas då de möjligen skulle ha negativa konsekvenser för monteringstiden.

5.3.8. Kabeldragning

För att driva detta system kommer det behöva användas flera motorenheter. Motorenheternas uppgift kommer att vara att förflytta robotarna. Motorenheterna och robotarna kommer arbeta ifrån samma system. Med samma system innebär samma styrsystem för mjukvara som kontrollerar robotrörelserna. Styrsystemet för Robotarna benämns IRC5, se bilaga 10 för specifikationer för styrsystemet.

För att förflytta robotarna enligt systemen som har tagits fram som koncept för denna station krävs 4 motorenheter per robot. 1 motorenhet som för roboten i Z-led, 1 för att föra roboten i X-led och 2 motorer som för roboten i Y-led. Med tre robotar innebär det att det kommer krävas 12 motorenheter totalt för att detta system ska fungera.

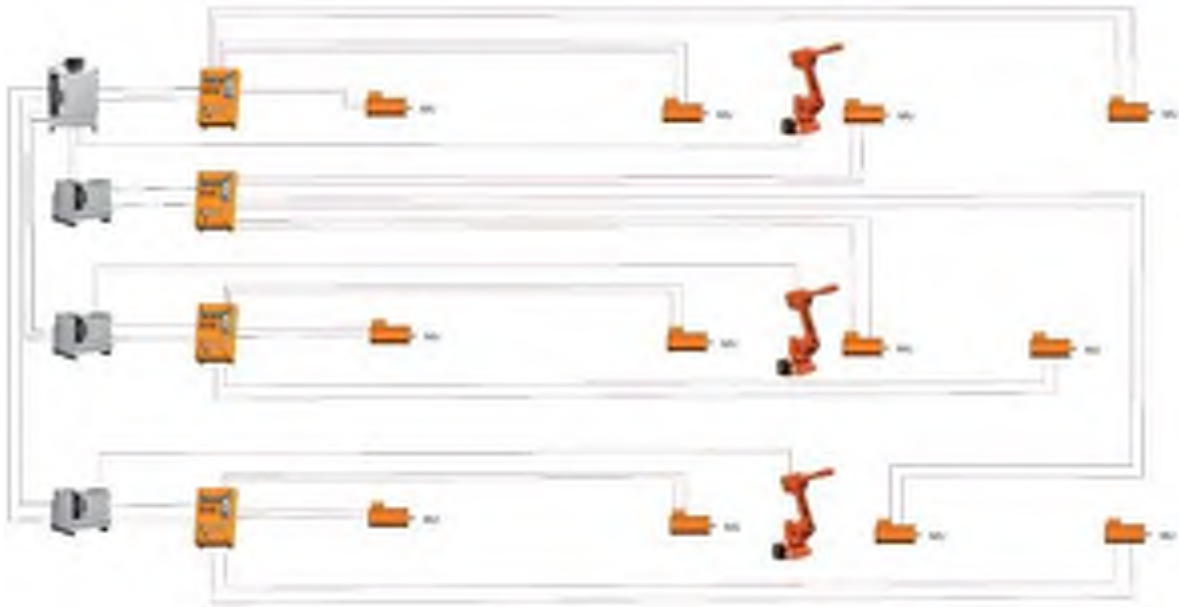
Systemet är uppbyggt så att max 1 robot och 3 motorenheter kan kopplas till en controller eller drivmodul. Detta gör att det kommer behöva minst 1 controller och 3 drivmoduler om alla 12 motorenheter ska kunna användas. 3 motorenheter blir då kopplade till kontrollern och resterande 9 motorenheter blir kopplade till de tre övriga drivmodulerna.

I samtal med ABB är detta vad som är max som deras styrsystem klarar av. För att motorerna ska kunna röra sig fritt krävs att det dras flexibla kablar från drivmodulerna till motorenheterna och robotarna. Standardsortimentet av flexibla kablar som ABB erbjuder är ej tillräckligt långa för att det skulle fungera att dra en kabel från drivmodul som sitter på en fast position till att robot som har rört sig till ena enda av kranbalksystemet.

Efter dialog med ABB har det dock visat sig att den längsta flexibla kabeln som går att föra mellan en drivmodul och en robot/ motorenheter kan räck upp till 50 meter. Denna kabel ska vara testad att fungera. Denna längd skulle räcka för att ge en räckvidd för hela systemet och

drivmodulen har en fast position. Nackdelen som togs upp med en sådan lång kabel dock är att den skulle bli mycket dyrare än standard kablarna.

Med 12 motorenheter och 3 robotar som kan ha varierande längd på kabel upp till 50 meter finns det väldigt många olika varianter på att dra signalkablarna. Ett koncept valdes för att illustrera möjlig väg att dra signalkablarna. Tanken är att försöka ha så kort väg som möjligt och att kontrollern samt drivmodulen står still positionerade på marken och långa flex-kablar räcker ut till motorenheterna och robotarna. Konceptet för kabeldragning visas i figur 28, se även bilaga 7 för förtydligad bild.



Figur 28 - Kabeldragning

De röda kablarna i figur 28 illustrerar flexibla långa kablar. De flesta är upp till 50 meter långa. De svarta kablarna illustrera icke flexibla kablar som är väldigt korta. De kan tas från ABB:s standard sortiment.

Förutom signalkablarna mellan drivmodul och robot ska konstruktionen även erbjuda plats för signalkablar och tryckluft till verktygen som roboten jobbar med samt elkablar till kontrollern och drivmodulen. Dock har dessa kablar inte ansetts som kritiska då det inte har fallit i någon risk att inte gå att dra. Det finns ingen begränsning för hur långa de kan vara till exempel. Att dra dessa kablar har fallit in i kategorin att det inte kommer vara något problem att dra dem.

Hur kablarna ska föras i stationen är via kabelkedjor. Tanken är att det ska finnas en kabelkedja som rör sig i varje led som roboten kan röra sig på och för varje robot. Alltså ska det finnas 9 kabelkedjor då det ska finnas en kedja för varje led och en för varje robot. Kedjorna för X-led och Z-led har möjlighet att vara mittplacerade för att spara in på kabelkedjanslängd. Positionen för kabelkedjorna har diskuterats med Conductix (Dahlen, 2018).

5.3.9. Special montering

För denna konstruktion finns det vissa specialområden som har studerats extra noggrant.

Specialområde 1 – Montering av Z-Axel.

Hur monteringen av Z-axeln ska gå till har varit svårt att begrunda för att falla inom ramen av monteringsvänlig. Endast ett koncept har tagits fram för att lösa problemet. Det går ut på att montera Z-Axeln från sidan mot X-Axeln. Z-axeln har monterats mot en rörligplatta som kan röra sig i X-led samt den delen som Z-axeln monteras emot är även rörlig i Z-led. Dessa plattor ska använda sig av det slutgiltiga konceptet för inpassning för att placeras rätt.

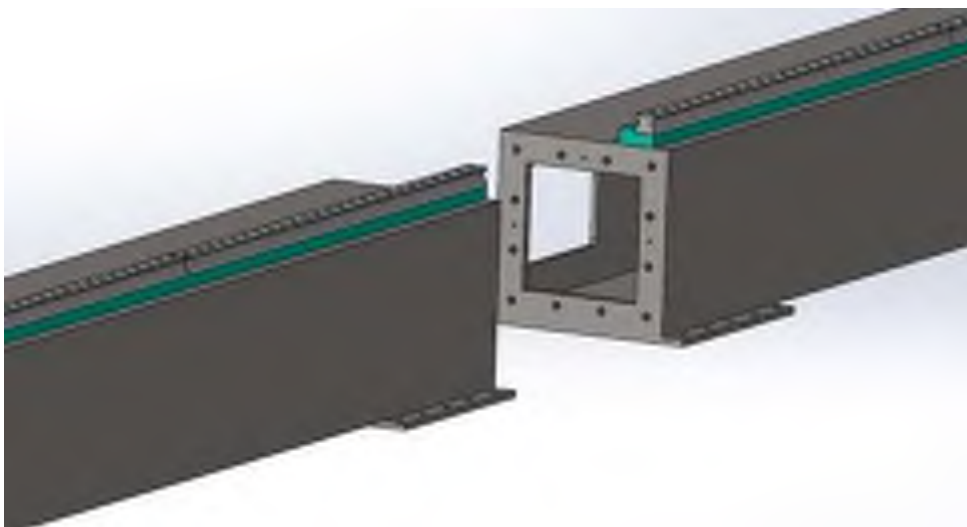
Specialområde 2 – Mitten skarv.

Helst ska styrningen ej vara avbruten av en skarv. Detta är för att om styrningen bryts a en skarv finns det risk att styrningen inte matchar precis där och det kan bli ett hack som stör den linjära rörelsen. För att undvika detta går det att montera styrningen genom att mäta om den varje gång konstruktionen monteras ihop. Dock vill detta undvikas då det är tidskrävande och tanken är att styrningen ska vara förmonterad på ramverket när det monteras ihop för att spara tid.

I X-led och Z-led går det att ha förmonterad styrning på och undvika en skarv. Dock går detta inte att genomföra i Y-led då Y-led är 20 meter och ej får plats i en 40 fots-container. Det innebär i mitten av Y-led måste en skarv ske. Detta stör styrningen. För att ta reda på hur stor påverkan denna skarv har på styrningen gjordes olika koncept för att illustrera hur styrningen skulle hanteras vid mittenskarven. Koncepten som visas nedan är visade med linjärstyrning men de är representerade med koncepten representerar alla typer av koncept för styrningar.

Koncept 1 – Mitten skarv:

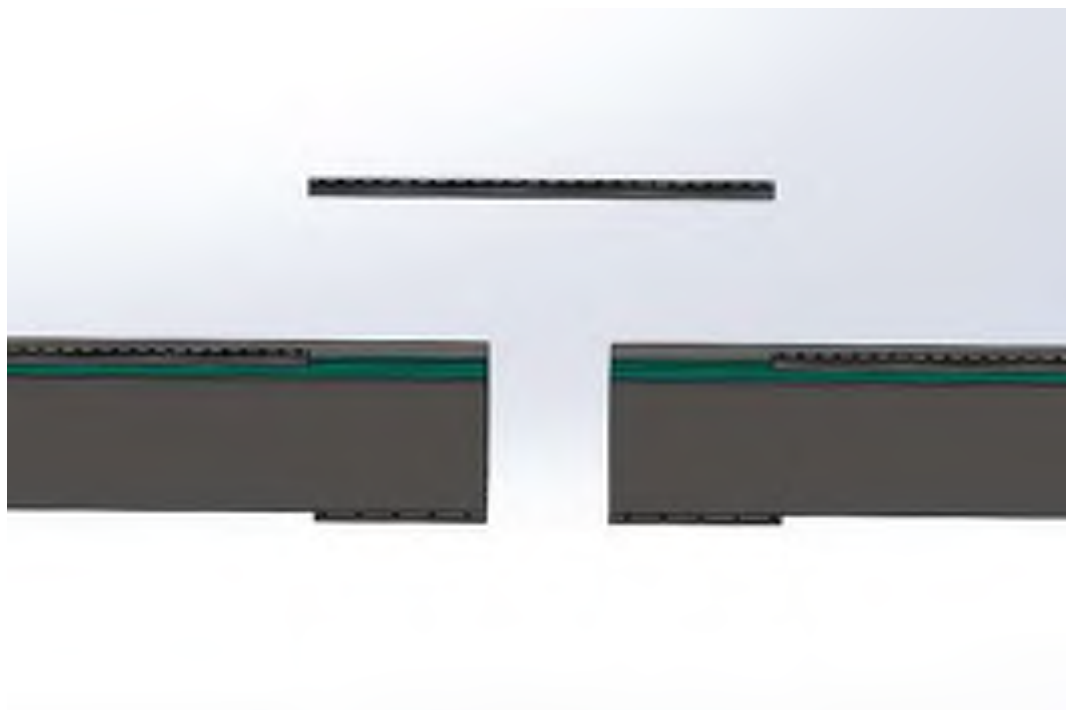
Inga speciell åtgärd krävs, det beror på vilken typ av styrningen som används, se figur 29:



Figur 29 - Mitten skarv

Koncept 2 – Mitten skarv:

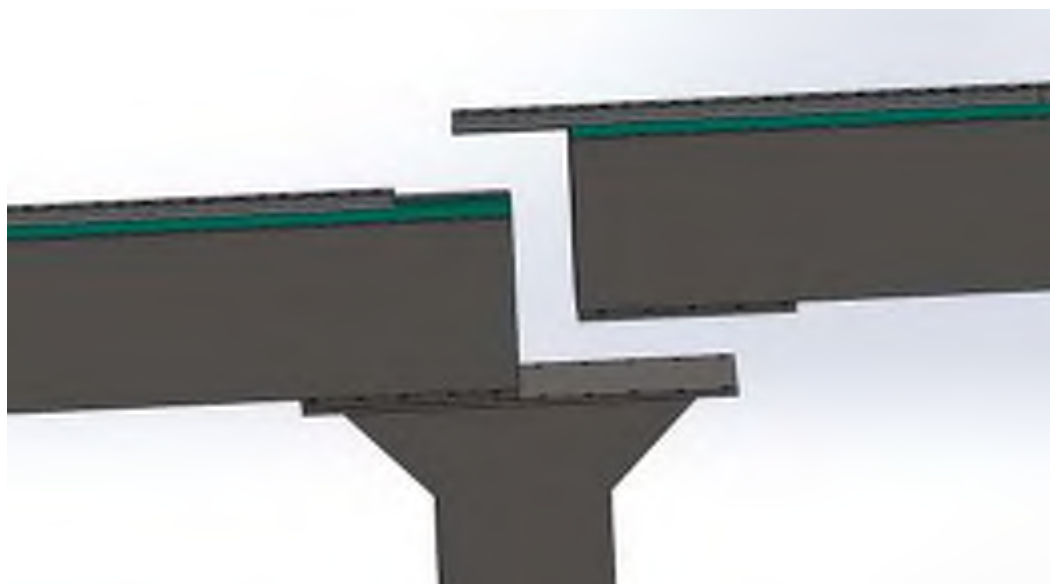
Ha större delen av styrningarna för monterade och en liten del som täcker över skarven som får mätas in vid montering, se figur 30.



Figur 30 - Mittenskarv 2

Koncept 3 – Mitten skarv:

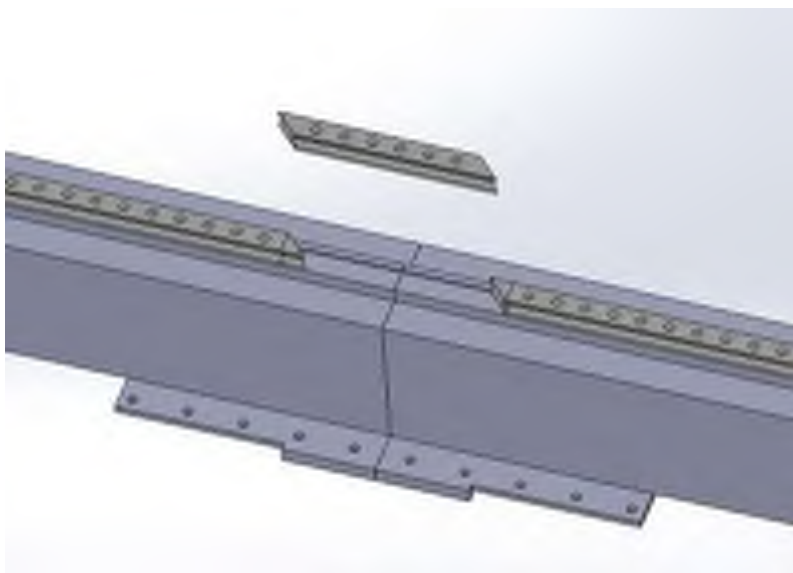
Ha en del av den förmonterade styrningen utstickande på den ena balken som matchar in mot den andra balken, se figur 31.



Figur 31 - Mittenskarv 3

Koncept 4 – Mittenskarv:

Använd liknande som koncept 2 men med en tillskuren styrning som matchar in mot de färdigmonterade styrningarna.



Figur 32 - Mittenskarv 4

Specialområde 3 – Upptag av fel.

Att röra roboten längs Y-led har identifierats som problematiskt. Detta är av flera anledningar. Dels för att denna konstruktion blir utsatt för en miljö med växlande temperatur vilket gör att konstruktionen förändrar sig med avseende på temperaturen. Dessutom är det i den leden som där parallellitet är svårast att uppnå mellan styrningarna då det är den längsta rörelseleden. Det är också den svåraste leden att uppnå parallellitet då styrningen för den leden består av många förmonterade delar som ska monteras ihop mot varandra. Det är svårt att säkerställa att alla dessa balkar kommer att linjera mot varandra perfekt även med anpassningsfunktioner.

Med tanke på att finns stor risk för att styrningen inte helt linjera med varandra och att temperaturpåverkan kommer göra deformationsändringar måste det finnas ett system som kan ta upp parallellitetsfel och motverka detta i Y-led.

Hur detta görs är genom att ena sidan i Y-led kommer agera som en så kallas master sida medan den andra sidan blir en slav sida. Detta görs genom att styrningen på ena sidan blir fast i alla riktningar utom rörelse riktningen och den andra sidan får fler frihetsgrader att röra sig på förutom själva rörelseriktningen. Detta gör att det är möjligt att ta upp eventuella fel och även att konstruktionen kommer vara tillgänglig för att återgå till samma position som den befann sig på innan (Andon, 2018).

För att uppnå detta har olika koncept tagits fram.

Koncept 1 – två olika typer av styrningar:

Detta koncept går ut på att använda sig av linjär styrning på ena sidan som låser i alla riktningar. I den andra ändan finns en helt annan typ av styrning som enbart tar upp last åt ett håll.

Koncept 2 - En fästpunkt med snevriden linjärstyrning mot körriktningen:

Detta koncept går ut på att slavsidan ska sitta fast med en fästplatta som kan röra sig snedvridet 90 grader från körriktningen. På detta sätt så tar fästplattan upp alla eventuella fel.

Koncept 3 - En fjäderbelastad styrning:

Detta koncept går ut på att de lager som ligger emot skenan är fjäderbelastade. Det betyder att alla eventuella parallellitetsfel som kan uppstå tas upp av fjädrarna och inte övriga konstruktionen.

Detta problem att säkerställa att styrningen ska linjera parallellt utan skarv uppstår ej i samma grad för Z-led och X-led då de åksträckorna ej behöver vara så långa att de behöver separeras av monteringen vilket gör att de alltid kan vara förmonterade på varandra.

5.4. Konceptutveckling:

Detta steg bygger på de koncept som vägdes i föregående avsnitt. Följordningen för konceptutvecklingen av de olika delsystemen presenteras i samma ordning som i föregående avsnitt.

5.4.1. Val av kranbalkssystem

Det var många faktorer som påverkade vilket koncept av kranbalkssystem som skulle väljas. Dels var det funktionalitet, hållfasthetsberäkningar samt duglighet med de andra konstruktionsområdena.

Till en början studerade hållfastheten. Hållfasthetsberäkningarna gick ut på att studera de mest kritiska lastfallen både dynamiskt och statiskt. Totalt blev det 7 lastfall som studerades.

Lastfallen beräknades med hållfasthetsberäkningar och verifierades med FEM – Analyser. Konstruktionens dimensionerande krav har varit beroende på styvhet och deformation. Hur mycket konstruktionen får deformeras har varierat beroende på lastfall.

Det främsta dimensionerande kravet grundade sig i vilket styrsystem som valdes. Då dessa är komponenter som har stor inverkan för konceptet samt är direkt påverkade av styvheten av konstruktionen.

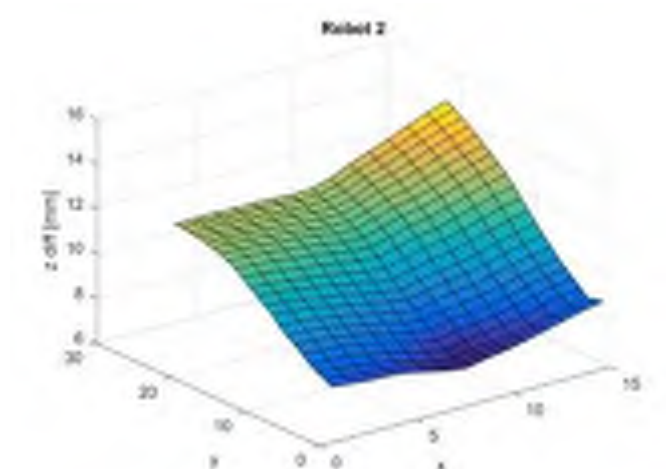
Således blev valet av styrningar de som sätter kravet för nedböjningen på balken. De styrningar som medger de finaste precisionskraven är även mest känsliga för deformation. För att undersöka hållfasthetskraven innebar det att undersöka hur mycket styrningen med finast precisionsgrad får

deformeras. Konceptet linjär-styrningar är det koncept som innebar finast precision och fick således vara den detaljen som satte dimensionskravet.

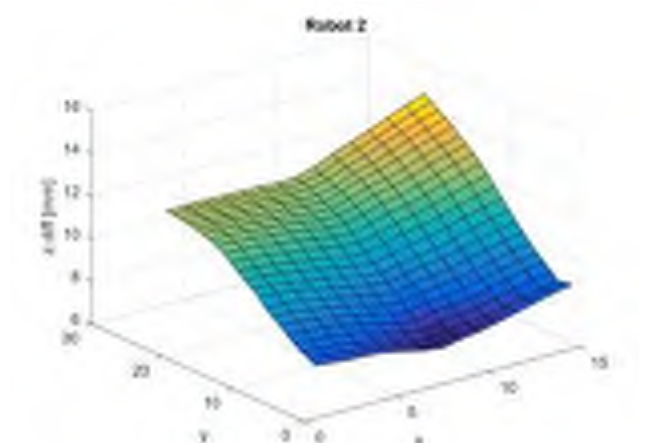
Detta ansågs även lämpa sig bra då det finns många leverantörer som erbjuder produkter för linjär-styrningar och de därmed borde finnas mycket teknisk data för detta. Dock motbevisades detta och det påträffades lite dokumentation som kunde vara lämplig för att bestämma ett deformationskrav. Detta var i och med att det är väldigt långa sträckor som styrningarna skulle verka vilket de normalt inte brukar användas till.

En mejlkonversation upprättades således med SKF för att undersöka hur mycket deras linjär-styrningar klarar av på så långa sträckor som behövs i detta fall. De hade svårt att svara på den frågan och det var svårt att hitta data på detta.

För att ta reda på deformationsgraden användes då modellen av denna station som är byggt i en liten skala. Denna modell bygger på principen att använda linjär-styrningar och det kunde då användas data ifrån den prototypen. Den data som kunde studeras var deformationsgraden som modellen bygger på. Figurerna 33 och 34 nedan visar nedböjningen för hur mycket prototypen sviktar:



Figur 33. Deformation från en kalibrerings process från modellen 1



Figur 34 Deformation från en kalibrerings process från modellen 2

Grafernan visar alla punkter på ett plan när en robot kalibrerar sig på prototypen. För att få en rättvis bild på hur en balk är nedböjd måste en x-axel studeras. Den största nedböjningen som återfinns är 1,389 mm. Detta är på en spännvidd som är 4 meter i och med att det är det som är spännvidden på balken för x-axeln i prototypen. Därmed fick de anses som ett godtyckligt värde för hur mycket en linjär styrning får deformeras. Givetvis skiljer det sig på modell för linjärstyrning med i dialog med SKF ansågs det som ett godtyckligt värde i och med att det var svårt att ge ett direkt svar.

Detta kan ställas då i relation med konceptet som utvecklas ska vara tre gånger större så kan deformationen vara 3 gånger större. Det vill säga att linjär styrningarna kommer klara och verka fungerande med en nedböjning på ungefär 4 mm på en balk som är 12 meter lång. Detta fick då bli det uteslutande kravet för dimensionerna och hållfastheten.

Ett annat krav som har haft betydelse är hur styva balkarna bör vara för att kunna anses som tillräckligt pålitliga att uppnå repeterbar noggrannhet som är huvudmålet med kranbalkssystemet. Grundmålsättningen för hållfasthetsberäkningarna är att beräkna ett tillräckligt styvt system som inte kommer att plasticera. Se bilaga 5 för att se hållfasthetsberäkningarna samt dimensionerande krav för varje last. Hållfasthets beräkningar har använt sig av elementarfall som återfinns i bilaga 9 samt studie för FEM-Analys som verifikation på beräkningarna som återfinns i bilaga 8.

För att studera duglighet och funktion gjordes en jämförelselista för att studera hur båda koncepten stod för varandra, se tabell 5.

Tabell 5: Jämförelsematrix över koncept 1 och 2

Krav:	Koncept 1	Koncept 2
Möjliggöra arbetsyta	0	+
Måste kunna fraktas	0	0
använda ABB:s Robosystem	0	0
Hållfasthetsegenskaper	0	-
Kunna uppge repeterbar noggrannhet	0	0
Ska kunna röra sig oberoende av varandra	0	0
Förflytta robotarna i en viss hastighet	0	-
Medge rörelse i alla led	0	0
Kunna använda 3 robotar	0	0
Ge utrymme för en bockningsstation	0	0
Medge öppenhet och flexibilitet	0	+
Lätt till service	0	+
Smuts för vitala delar	0	-
Få plats i en tält hall	0	0
Monteras på en betongplatta	0	0
Resultat:	0	0

Tanken med listan är att jämför koncepten med kraven som sattes i kravspecifikationen. I tabellen har det även tagit med ytterligare egenskaper som ansågs fördelaktiga när koncepten jämfördes. Jämförelsetabellen låter gantry-systemet vara helt nollställt mot alla krav och portal konceptet är en jämförelse. Detta betyder att koncept 2 får antingen ett plus eller minus beroende på om det anses vara bättre eller sämre än gantry-systemet. Detta liknar en pugh:s-matris dock är skillnaden att kraven ej är viktade. Anledningen för att det inte blev en hel pugh:s-matris var för att det var svårt att vikta kraven och de flesta kraven ansågs hyfsat jämlika. I slutändan när båda koncepten jämfördes ansågs de väldigt jämbördiga.

Beräkningsvärdena från bilaga 5 visar på att båda koncepten klarar styvhetskraven och ej kommer plasticera med de maxlaster som påverkar konstruktionen. Det sågs även att en båda koncepten var kompatibla med de övriga konstruktionsdelarna vilket innebär att ingen av de begränsande faktorerna ifrån resterande del av konstruktion påverkar vilket koncept som fungerar bäst.

I diskussion med Andon föredrog de Gantry-systemet. Detta gjorde att slutvalet kom att bli koncept 1. En av de största fördelarna som de även poängterade var att det är ett välbekant sätt att bygga, detta var fördelaktigt i och med att många delar i det här systemet är helt nytt och det har aldrig gjorts ett liknande system förut som är mobilt. Detta gör att om det går att göra något på ett sätt som är traditionellt och gjorts förut så välj helst det alternativet. Andon formulerade även detta argument att det är väldigt stora delar som ska förflytta på sig. Koncept 2 presenterar väldigt stora delar som ska förflytta sig. Även om det ses som teoretiskt möjligt att bygga koncept 2 tillräckligt styvt så rent erfarenhetsmässigt förespråkar de att de ska sikta efter att förflytta så lätta objekt som möjligt för att undvika problem i praktiken som är svåra att se.

Därmed blev det slutgiltiga valet för kranbalkssystem koncept 1: Gantry-systemet.

5.4.2. Val av styrning

Ett av de viktigaste valen av att uppnå repeterbar noggrannhet var valet av styrning. Detta är för att det är denna mekanism som hanterar hela konstruktionens rörelse. Om styrningen har för grova toleranser ger det utrymme för konstruktionens rörliga leder att förflytta sig i en oönskad riktning och då i sådana fall hamna fel. Detta beskrivs även som att styrningen är för oprecis eftersom när styrningsmekanismen rör sig i rörelseriktningen kan styrningen förflytta sig i en annan riktning än menat, exempelvis styra i sidled och då få svårt att hitta tillbaka till ursprungspositionen.

För att undvika detta krävs en styrning som kan hålla en noggrann positionering. Väldigt tidigt i beslutsprocessen eliminerades konceptet för kättingtelfer då det ansågs som den typen av styrning var för oprecis för att kunna uppnå repeterbar noggrannhet. Detta gjordes i samråd med robotdalen och Andon automation (Andon, 2018) (Robotdalen, 2017). Ytterligare undersökning för detta koncept valdes därför inte göras.

Det återstående alternativen var då antingen att använda sig av skenstyrningar eller bearbetade räls. Skenstyrningar skulle innebära den högsta precisionen men i konversation med SKF skulle det vara svårt att använda dem i en skarv där styrningarna är förmonterade (SKF, 2018). Det vill säga att det kopplar till problemet med skarven i Y-Led.

Detta innebär att det alternativet som återstår är bearbetade räls eller hitta en speciell typ skenstyrningar som klarar att monteras med en skarv i mitten. Dock medger denna typ av styrning mindre precision och på så sätt ger mer upphov till repeterbar noggrannhet ej uppnås. Hur stor skillnaden blir mellan skenstyrning och den sist nämnda metoden kommer är svårt att säga exakt. På grund av många faktorer som spelar roll såsom hur väl rälsen bearbetas och sträckan som ska åkas, samt hur många skarvar som finns är det svårt att hitta en rimlig test metod för att jämföra. I slutändan fick valet då gå på erfarenhet från andra konstruktörer inom området. Philip Holst från robotdalen menar på att det skulle gå att kunna tillverka bearbetade räls som erhåller tillräcklig hög precision. Vid samtal med Mats Gårdestam från Acumo ska det finnas skenstyrning som är väldigt precisa men ändå kunna montera på en yta som är relativt grov och

klara att passa in mot varandra då det finns en skarv. Med avvägning från robotdalen och Andon så valdes tillslut skenstyrningar som går att montera med en skarv i mellan.

5.4.3. Val av ihopfogning

Valet av ihopfogningsmöjligheter grundar sig mest i ur enkelt det teoretiskt sätt är att montera ihop stationen. Därmed låg grunden för konstruktionstänket för varje fläns att det skulle siktas på att göra en utanpåliggande skruvfläns. Om det ej var möjligt att göra detta på något sätt så blev valet direkt att göra en innan påliggande fläns.

Utformningen av fästelementen och valet av koncept påverkades även punkter från DFA verktyget, se kapitel DFA. De punkter som togs i beaktande i utformning av koncept

- Minimera antalet detaljer
- **Minimera antalet unika fästelement**
- Designa produkten med en baskomponent som andra komponenter fäster mot
- Baskomponenten ska inte förflytta sig under montering
- Försök effektivisera sammanställningen genom att hitta minst antal steg att montera ihop produkten
- **Undvik monteringsmetoder som är svåra att göra bakvänt eller återanvända (exempelvis knytning)**
- Designa produkten med tanke på vem eller vad som ska montera ihop produkten
- Designa produkter som är symmetriska
- Se till att använda sig av fasningar och styrningar för att underlätta införande och inriktningar av detaljer

5.4.4. Val av drivning

För valet av drivning valdes kugg och kuggstång. Detta är för att det är alternativ som både är enkelt att montera och erhåller tillräckligt hög precision. Remdrift ansågs som för svårt att montera och erhöll inte lika hög precision och kulskruv ej var ett relevant alternativ då kulskruv gör sig bäst vid kortare sträckor men ej när det ska vara så långa körbanor. (Mats, 2018) (SKF, u.d.)

Enligt anvisningar blev motorvalet begränsat till ABB:s motorenheter då det bara är de som är kompatibla med robotsystemet som ska väljas. Den motorn som valdes blev således deras största motor som är MU400. Detta är för att så stor bromsförmåga som möjligt är av önskemål för att kunna stoppa konstruktionen. Till detta krävdes en växellåda som klarar av att göra en utväxling att hastigheten och valet av kugg och kuggstång som gör att hastigheten kan befinna sig på 0,5 m/s under drift. Hastigheten för 0,5 m/s var något som diskuterades inom projektgruppen och verifierades att det är en lämplig hastighet av Andon.

5.4.5. Val av inpassning

Av de koncept som valdes för att passa ihop bitarna så valdes koncept 2. Den största fördelen med koncept 2 som identifierades var att det gick att använda samma typ av inpassning och tänk att passa in på flera ställen. Detta innebär att det förenklar tillverkningen. En nackdel för koncept 1 som identifierades var att de förmodligen skulle ta upp för mycket last vilket ej är poängen med instyrningarna utan poängen är att föra de på rätt plats och förenkla monteringen utan att behöva mäta in detaljerna. Om instyrningarna tar för mycket last innebär de att de minskar i precision och måste bytas ut oftare. Därför valdes koncept 2 med kona som har en hona och hane ände.

5.4.6. Val av mittenskarv

Vid valet av mittenskarven valdes koncept 2. Detta gjordes i diskussion separat med Acumo, SKF och Mekanex. Samtliga parter sa individuellt utan något inflyttade av varandra att det var det överlägset bästa konceptet att hantera mittenskarven oavsett styrning och de andra varianterna ej var att rekommendera. Några av de andra varianterna skulle kunna medge att det går aningen snabbare att montera ihop anläggningen men det var inte värt att offra eller chansa på i och med att det ej vinns så mycket tid och offras väldigt mycket precision (SKF, 2018) (Mats, 2018) (Jönsson, 2018).

5.4.7. Val av upptagning av fel

Hur upptagning av fel skulle hanteras beror väldigt mycket på det slutgiltiga valet av styrning. I och med att det slutgiltiga valet av linjär styrning blev med skenor valdes den metoden som lämpar sig med skenstyrningar. I och med att det är den enda styrningen som har valts för konstruktionen blev koncept 1 uteslutet direkt. I och med att Skenstyrning är svåra att fjäderbelasta valdes koncept 2 där ett par med skenstyrningar som rör sig på en snevriden platta som rör sig i en annan frihetsgrad det uteslutande valet. Det är även denna metod som Andon Automation rekommenderar.

5.5. Produktrealisering

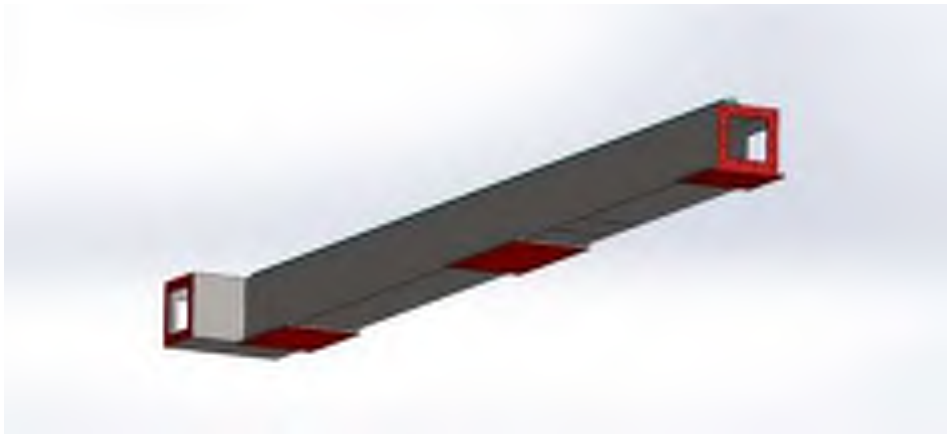
Detta delkapitel innefattar hur koncepten togs vidare i ett stadie för att realistiskt tillverkas och fraktas och se ut i verkligheten.

5.5.1. Tillverkning

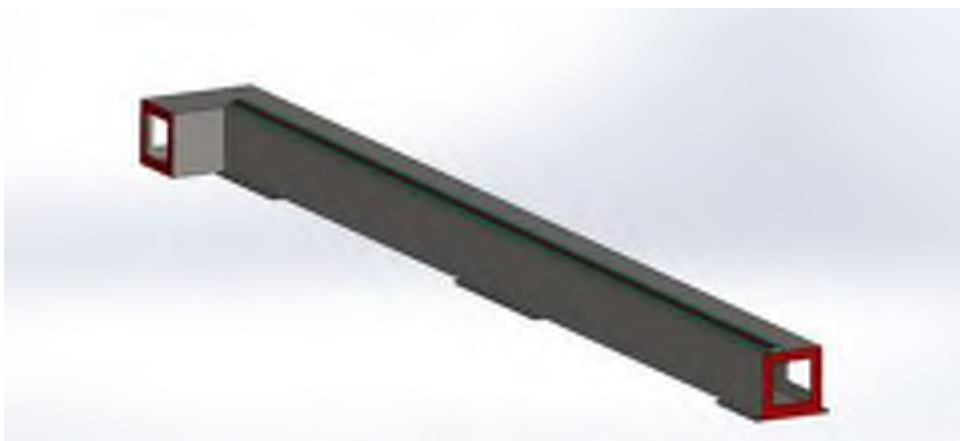
För att detta projekt ska kunna vara realiserbart var det tvunget att undersökas huruvida realistiskt det skulle vara att tillverka denna konstruktion. Den stora frågan är hur balkarna skulle tillverkas då beräkningarna visar att lasterna är för stora för att använda sig av standardbalkar, se bilaga 5 lastfall 7.

Den stora utmaningen är att tillverka balkarna samt att bearbeta dem på ett sådant sätt så att de får tillräckligt fina ytor att montera skenstyrningar på dem. I diskussion med leverantörer är det möjligt sättet att tillverka dessa balkar på sådant sätt att de svetsas ihop som lådor och bearbetar de ytor som har fin precision för att tillverka dessa balkar.

En viktig detalj inom tillverkning är att kunna verifiera att ytor på detaljer som ligger an mot andra komponenter i konstruktionen kan planas i en fräs. Dessa ytor kallas även för gränssnitt. Att säkerställa att gränssnittet är plana är viktigt för att verifiera att detaljerna ligger rakt mot varandra. Exempelvis för ett viktigt gränssnitt är där styrningarna ska placeras an mot balkarna. Detta gränssnitt är viktigt för att verifiera att styrningarna ligger raka mot resten av konstruktionen. Nedan visas hörnbalkarna för konstruktionen och förslag för tillverkningen:



Figur 35. Tillverkning av balk 1



Figur 36. Tillverkning av balk 2

Figurerna 35 och 36 visar förslag på hur balken skulle kunna tillverkas då tanken är att det svetsas ihop först. Sedan bearbetas de röda ytorna för att bli plana. Storleken på balkarna skulle då behöva anpassas till maskinerna i vald verkstad. De röda ytorna är då gränssnitten som andra balkar/ pelare och styrningar ska ligga an mot. Förslaget godtogs av de maskinverkstäder som kontaktades och de ansågs möjligt att tillverka. De som kontaktades var IMS Maskinteknik AB och Larsson & Kjellberg. Övriga delar i konstruktionen sågs inte som några svårigheter att tillverka i en maskinverkstad då detta förslag godtogs. Detta gjorde att det ansågs möjligt att tillverka denna konstruktion.

5.5.2. Kabeldragning

För att se till att kablarna är skyddade samt att de rör sig korrekt krävs ett system för att föra kablarna. I diskussion med företaget Conductix fanns det olika alternativ. Bland annat att byta ut kablarna mot skenor, använda sig av kabelrullar eller kabelkedjor. Vid en närmare titt på konceptet var det uteslutande valet kabelkedjor. Detta var för att använda sig av strömförande skenor ej skulle vara till någon nytta då flera medium en elektricitet skulle föras genom kablarna samt att det skulle bli väldigt många kabelrullar om det alternativet skulle väljas.

Därför undersöktes möjligheten att använda sig av kabelkedjor. Det skulle dock bli ett par robusta kabelkedjor som klarar utomhusmiljö och klarar en lång åklängd. Detta är dock genomförbart att tillverka (Dahlen, 2018).

5.5.3. Tälthall

Anledningen för användning av tälthall är ett direktiv som sattes i början av projektet. Detta direktiv grundar sig i att undvika så stor väder påverkan som möjligt. Bland annat vind och temperatur förändringar.

I och med att denna konstruktion ska vara bestämt att befinna sig i en tälthall gjordes en analys över vad som är möjligt. Leverantörer kontaktades för att ha en närmare dialog om hur vilken typ av tälthall som skulle passa applikationen. Ett urval av de som kontaktades var: Hallbyggarna, Tältpartner och Hallgruppen. Dessa var de som den närmaste dialogen angående ämnet var med.

Eftersom att måtten skulle vara kring 20 x 8 x 12 (längd, bredd, höjd) skulle det innebära en väldigt lång och hög hall. Detta var någonting som samtliga leverantörer såg som ett problem och inga tälthallar från standard utbudet skulle passa. Det största problemet var höjden. Att hela tälthallen skulle fungera som ett stort segel menar de. De menar på att om en tälthall ska vara så hög måste de vara mycket bredare.

I dialog med Thomas Carlsson från Hallbyggarna skulle det dock vara möjligt att bygga en special hall som är extra förankrad i marken. Detta var dock problem för leverantören då de är vana vid att bygga special hallar (Carlsson T. , 2018).

5.5.4. Frakt

Genom hela konstruktionens utformning har kravet att konstruktionen ska kunna vara modulariserbar och kunna plockas isär i bitar för att transporteras. Det finns olika sorters transport lösningar men enligt projektets riktlinjer har det varit önskvärt att använda sig av en standard container. Genom att använda sig av en standard container finns argumentet att många oförutsedda komplikationer undviks under frakt. De största containern är 40-fots containrar.

Olika fraktlösningar kollades på med företaget EQpack. EQpack är ett företag som specialiserar sig på fraktlösningar. De som låg till grunden var att studera huruvida balkarna samt robotarna kunde fraktas i en container. Det som studerades och skulle fraktas visas i tabellerna 6 och 7 nedan, längderna som anges i tabell 6 är de längder på balkar för ramstrukturen:

Tabell 6. Frakttabell 1

Balk	Tvärssnitt	Längd	Vikt	Antal
	mm	mm	ton	st
Bärande pelare	500 x 500	5000	2	10
Ram balk 1	400 x 500	10000	2	4
Ram balk 2	400 x 500	11500	2	2
Traversbalk	560 x 480	11500	3,5	3
Sticka för Z-led	550 x 550	4000	0,9	3

Tabell 7. Frakttabell 2

Vad	Modell	Vikt	Antal
		kg	st
Robot	IRB-4600	435	3
Styrskåp	ICR5	150	1
Drivmodul till styrskåp	ICR5	130	3

Dessa var det största delarna och påverkade frakten mest. Med dessa mått på balkar var det enda alternativet en 40 fots container. Innermåten för en 40-fots container är: 12032 x 2350 x 2695 mm (Container tjänst, u.d.). Dock kan måtten variera en aning men det är väldigt snarlika. I och med att måtten för balkarna passar in i containern sågs en lösning att transportera konstruktionen. Dock insågs det väldigt snabbt att allt inte kommer kunna gå in i en container utan det kommer förmodligen behövas minst 2.

6. RESULTAT

Detta kapitel presenterar slutresultatet av arbetet. Slutresultatet redovisar i detalj hur de olika konstruktionskomponenterna fungerar i detalj och anknyter till helheten av konstruktionen.

Resultatet av arbetet presenteras i två delar. Först presenteras det tekniska resultatet efter arbetet av studien. De kan i viss mån ses som delkoncept för slutet av studien. Efter det så presenteras resultatet utifrån de mål som sattes i början av projektet.

6.1. Slutkoncept

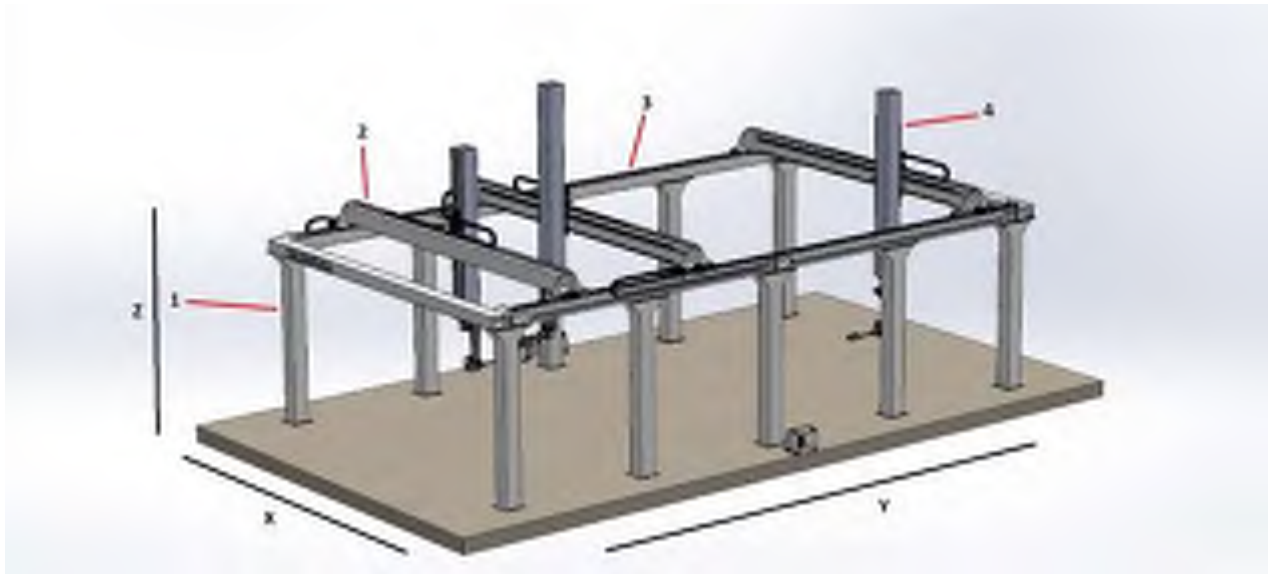
Studien resulterar i ett koncept på hur denna automationsstation kan tänkas konstrueras och förverkligas. Slutkonceptet visas i figur 37 nedan.



Figur 37. Slutresultat av gantry:n

6.1.1. Uppdelning av delar:

Bilden nedan beskriver uppbyggnaden av konstruktionen och vad de olika primära delarna är benämnda till samt vad rörelseriktningarna är benämnda till:



Figur 38. Benämning av delar

De primära delarna som visas på figur 38 ovan enligt nummer beskrivningen är:

1. Pelare
2. Robotbalk
3. Bärande balkar
4. Sticka

Stickan är den balken som kan röra sig upp och ner i Z-led.

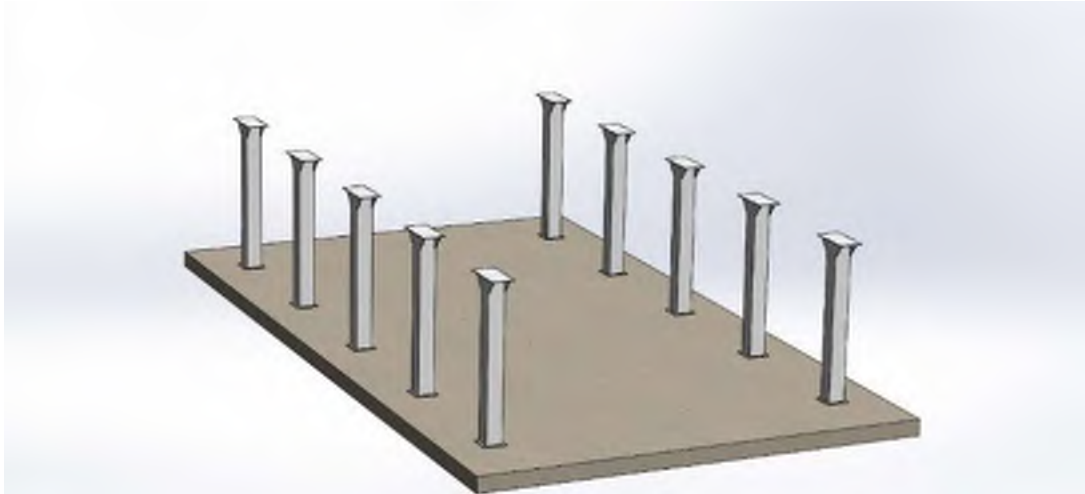
De primära rörelseriktningarna är:

1. Z-led: Höjdled
2. Y-led: Långa sträckan
3. X-led: Rörelse längs bredsidan

6.1.2. Montering av konstruktionen

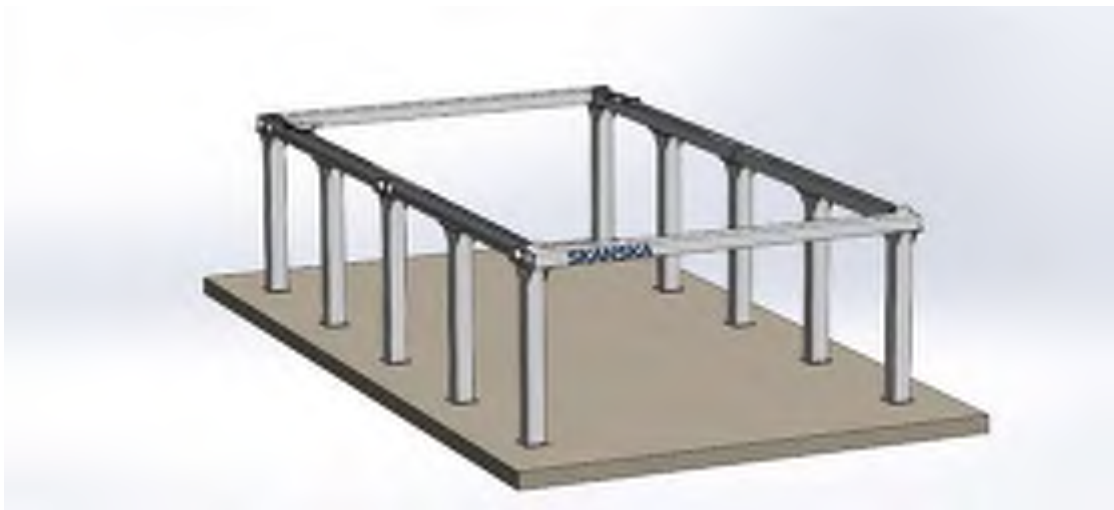
För att få en lätt montering av konstruktionen är tanken att göra en förmontering av konstruktionen. Med en förmontering går det att mäta in styrande detaljer i förväg innan Gantry:n kan monteras på plats. När instyrande detaljer är inmätta efter första monteringen kommer resterande monteringar att gå smidigare då det går att utnyttja komponenterna som styr in balkarna mot varandra. För att förklara hur konstruktionen fungerar beskrivs nedan hela monteringskedjan.

Tanken med konstruktionen är att pelarna ska monteras först med grundbultar. På detta sätt är pelarnas höjd justerbar. Höjden kan mätas in med ett trackersystem med väldigt fin precision. Se figur 39:



Figur 39. Resultat - Pelares position

Följande steg är att montera på de bärande balkarna, se figur 40:



Figur 40. Resultat montering av bärande balkar

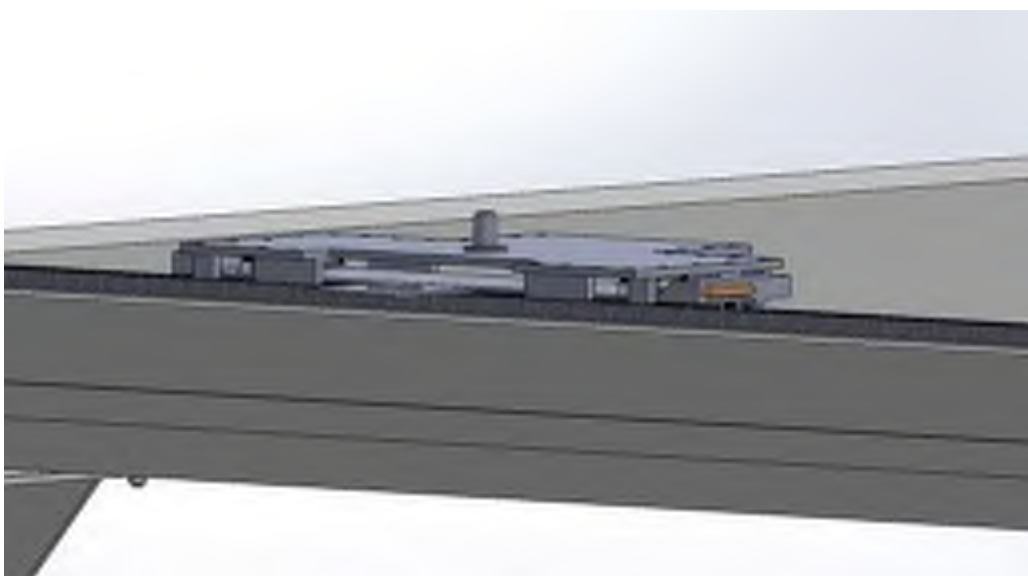
Dessa balkar kommer då ha en bestämd höjd, men given position i x- och y-led är dock ej bestämt. Detta gör dock inget i och med att en sida kommer vara rörlig och ta upp parallellitetsfel. I och med att konstruktionen kommer kunna ta upp fel i x-led och rörelseriktningen för robotbalkarna ska röra sig i y-led behöver inte de bärande balkarna ha en given position för x- och y-led. Det som är viktigt är att balkarna linjerar mot varandra för styrningens och drivningens skull.

Då balkarna är monterade ska skenstyrningarna, kuggstänger för drivningen samt vagnarna som robotbalkarna är monterade på monteras. Dessa komponenter kan mätas in för den första monteringen men kan sedan sitta kvar på sina givna positioner för resterande monteringar. Den enda delen av skenstyrningarna och kuggstången som ej kan vara kvar är den delen som ligger över skarven i y-led. Skarven i y-led visas i figur 40.

I figurerna nedan visas vagnarna som robotbalken ska fästas vid. Ena sidan är låst i alla riktningar förutom Y-led. Den andra vagnen har styrningar även monterade så den sidan även är rörlig i X-led. Det vill säga att den är flytande och på sådant sätt tar den upp alla ojämna fel. Med andra ord. Även om styrningarna som sitter i Y-led ej är helt parallella spelar det ingen roll då den flytande sidan kommer kunna anpassa sig till det. Figurerna 41 och 42 visar detta nedan:



Figur 41. Resultat - Robotbalkens vaggors position



Figur 42. Resultat - System för att ta upp parallellitetsfel

Nedan visas bilden på skarven på långsidan, Notera att på ett sådant läge har fogningen använt sig av en innanpå liggande fläns, se figur 43:



Figur 43. Resultat – Fogning

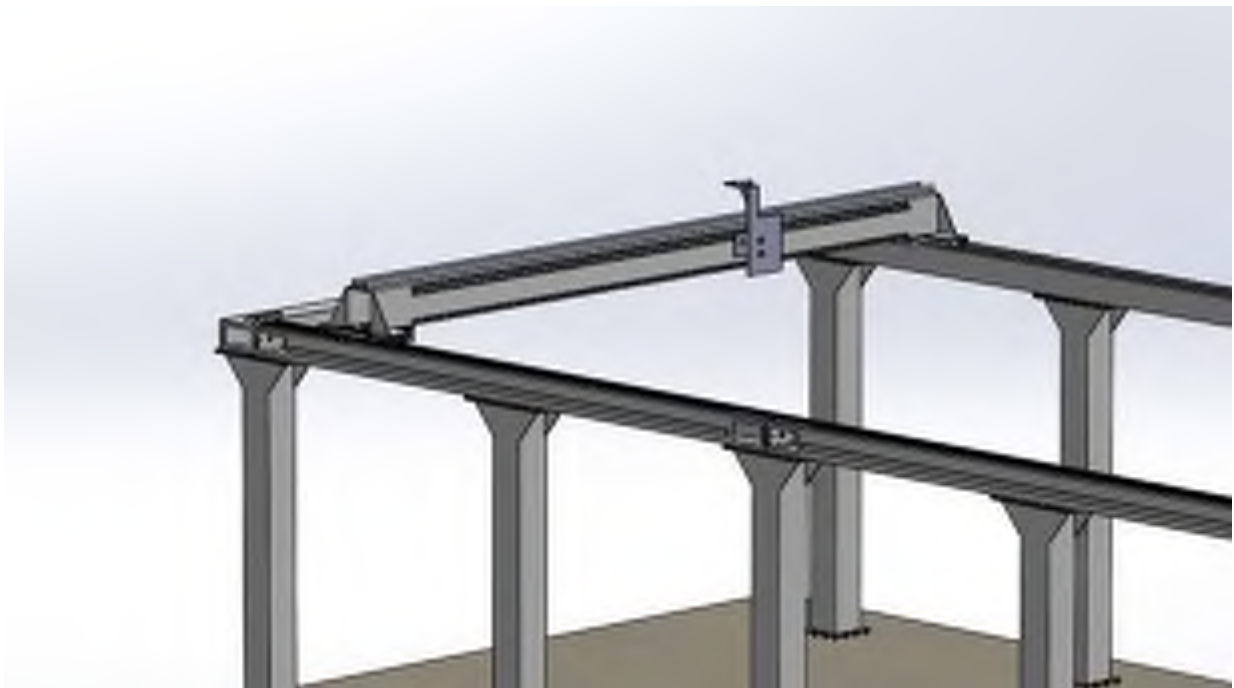
Från hållfasthetsberäkningarna insågs det att är lämpligt att använda sig av fyrkantsprofiler. Det är i och med att alla balkar och pelare belastas på flera olika sätt. I och med att fyrkantsprofiler

är lämpliga att ta emot flera olika lasttyper då de är mest stadiga för vridmoment har fyrkantsprofiler applicerats på hela konstruktionen.

Då Hörnbalkarna är på plats monteras sedan robotbalken. Detta görs via att fira ned robotbalken mot vagnarna som ligger an mot de bärande balkarna. Vid den första monteringen går ska styrningar, kuggstänger och vagnen som för roboten i x-led monteras. Dessa detaljer går att mäta in för en bra precision. För framtida användning går det att lämna kvar dessa komponenter som förmonterade på robotbalken, se figur 44 och 45.

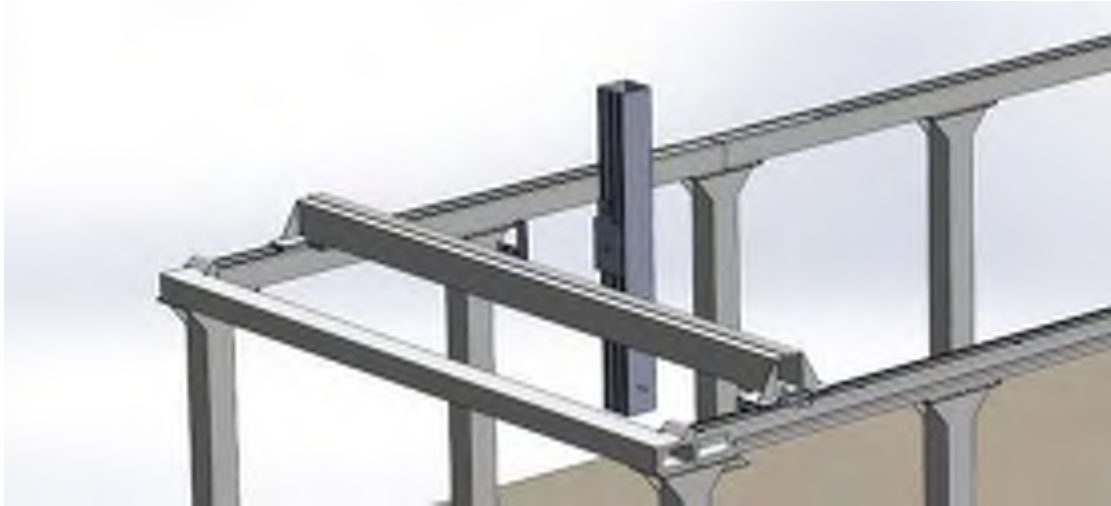


Figur 44. Resultat - Montering av robotbalk bild 1



Figur 45. resultat montering av robotbalk bild 2

Efter att robotbalken har placerats kan stickan som för rörelsen i Z-led monteras, se figur 46 och 47:



Figur 46. Resultat - Montering av Z-led 1



Figur 47. Resultat - Montering av Z-led 2

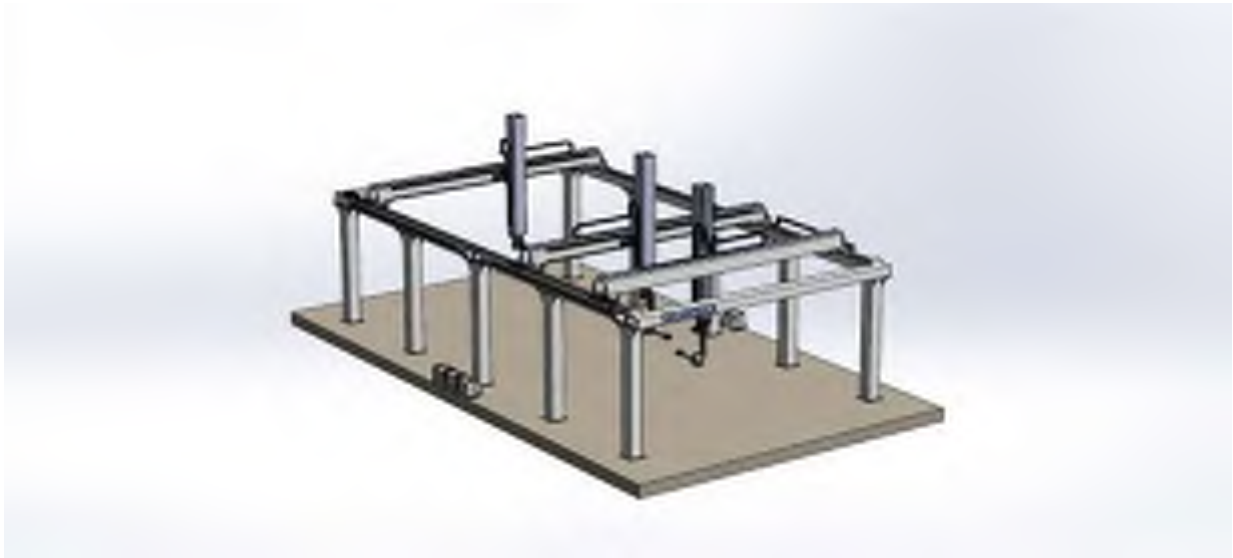
Detta görs genom att den förmonterad plattan på robotbalken möter en motsvarande förmonterad platta på z-led. Den förmonterade plattan för z-led möjliggör för att föra stickan upp och ner. Rörelsen i z-led fungerar på samma sätt som i de andra lederna. Det vill säga att skenstyrningar och kuggstång har monterats på en plan yta. Likadant i detta fall behövs skenstyrningarna och kuggstången bara monteras en gång och på så sätt vara förmonterad för resten av monteringarna.

Nästa steg går det att montera på motorer och kabelslingor.



Figur 48. Resultat - Montering av övriga detaljer

Detta upprepas för de två andra robotbalkarna, se figur 48:



Figur 49. Resultat - Färdig montering

Sista steget är att montera på robotar och slutligen koppla ihop det med robotsystemet, se figur 49.

Denna monteringskedja bygger på att monteringen har tillgång till en kran som kan lyfta balkarna. Detta har ansetts rimligt då företaget som avser att använda denna station i första hand är företaget Skanska och att använda lyftkranar är något de är vana vid. Efter monteringen avser det att byggas en tälthall runt stationen för att skydda mot väder och vind.

6.2. Val av komponenter

6.2.1. Linjär styrningar

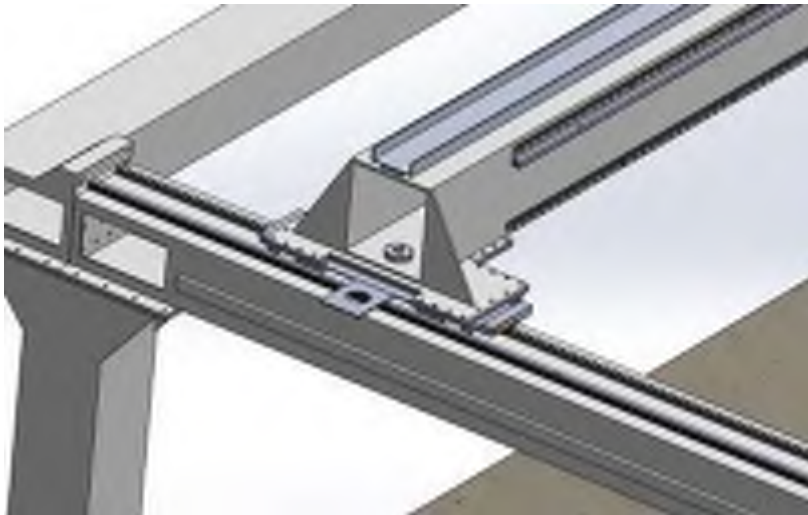
Slutgiltiga valet av linjärstyrningar blev från SKF. Valet blev en av SKF:s största modeller LLTHS 35 LA. Valet var i diskussion med SKF då klarar väldigt höga belastningar. Precisionen för dessa styrningar är som allra grävst 1 mm. Dessa styrningar skulle då användas överallt förutom den långa sträckan för Y-led. Där beräknas SKF-styrningar i och med att de är alldeles för precisa. Det går inte att hantera den skarven på mitten. Istället används styrningar från acumo från NS klassen även dem i storlek 35. Dessa styrningar gick att montera vid skarvar (SKF, 2018) (Mats, 2018).

6.2.2. Drivning och växellåda

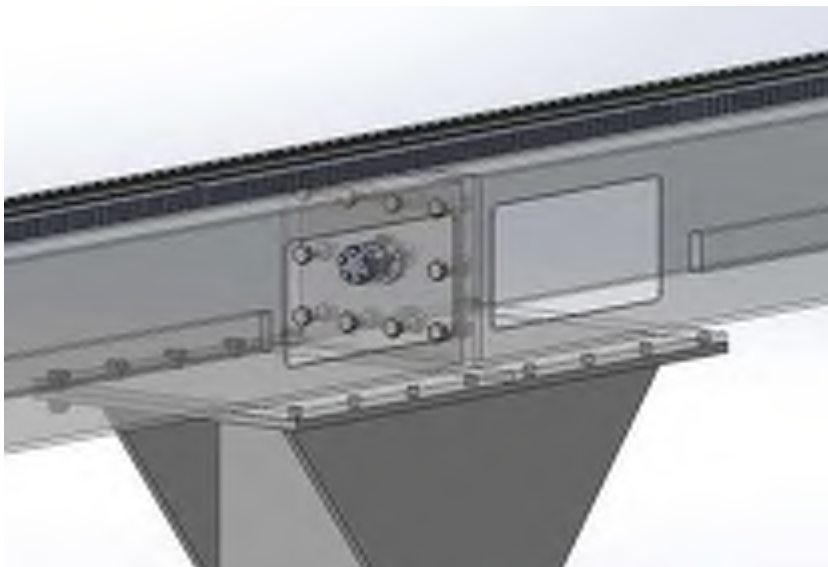
Valet a växellåda blev från Atlanta. Dessutom en kuggstångsdrivning med en radie om 40 mm. Se bilaga 6 för beräkning av kuggstångsdrift och växellåda.

6.3. Inpassning

Inpassning var en av de största frågorna som jobbades med. Tanken är att det ska gå så snabbt som möjligt att montera ihop konstruktionen. Valet av inpassning blev att köra på konceptet konan. Se figur 50 till 54 nedan:



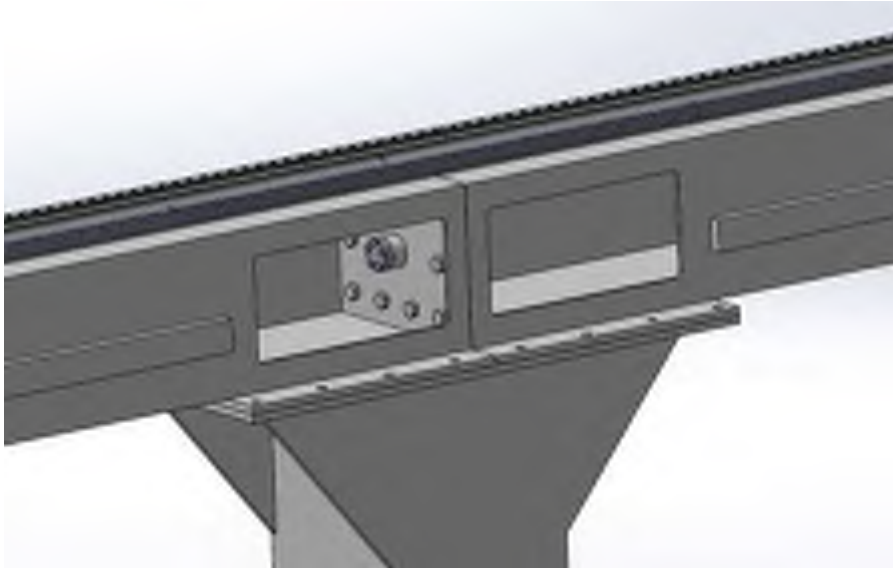
Figur 50. Resultat - Inpassning 1 mot robotbalk



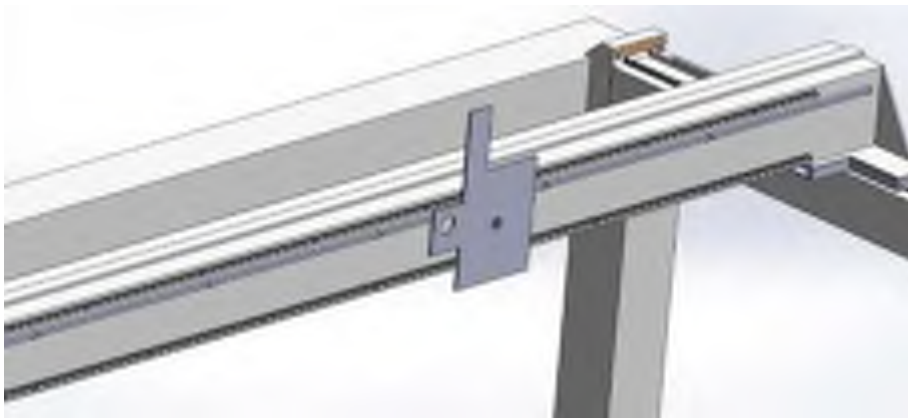
Figur 51. Resultat - Inpassning 2 i skarv mot för z-led bild 1



Figur 52 Resultat Inpassning 2 i skarv mot för z-led bild 2



Figur 53 Resultat Inpassning 2 i skarv mot för z-led bild 3



Figur 54. Resultat - Inpassning 3

Inpassningskonan finns vid skarvarna i Y-led, där robotbalken ska monteras på samt för Z-balken. Tanken är presenterad med en han-del och en hon-del som passas in mot varandra. Både hanen och honan går att mäta in och passa in mot resten av konstruktionen när allt har monterats på plats.

Tanken med konceptet och styrningarna är att montera ihop allt en gång och mäta in alla delar perfekt. En sådan här montering kan således ta väldigt lång tid för att få ihop allt och mäta in det ordentligt. Syftet med den första monteringen är dock inte att det ska gå snabbt utan att fästa dit inpassningsdelarna när allting sitter monterat perfekt. Inpassningsdelarna kommer kunna används vid nästkommande monteringar. I och med att inpassningsdelarna är inmätta på rätt plats kommer de kunna användas som guidning. Därmed kommer det kunna gå att slippa använda sig av inmätning senare monteringsstillfällen. Den enda mätningen som kommer vara nödvändig att ske är den då pelarna ska justera rätt höjd.

6.4. Slutgiltiga dimensioner för konstruktionen blev:

Dimensioner för de bärande delarnas ytterdelar är när stationen är monterad är:

X-led: 11500 mm

Y-led: 21000 mm

Z-led: 6560 mm

Detta ger en arbetsyta om:

X-led: 10500 mm

Y-led: 2000 mm

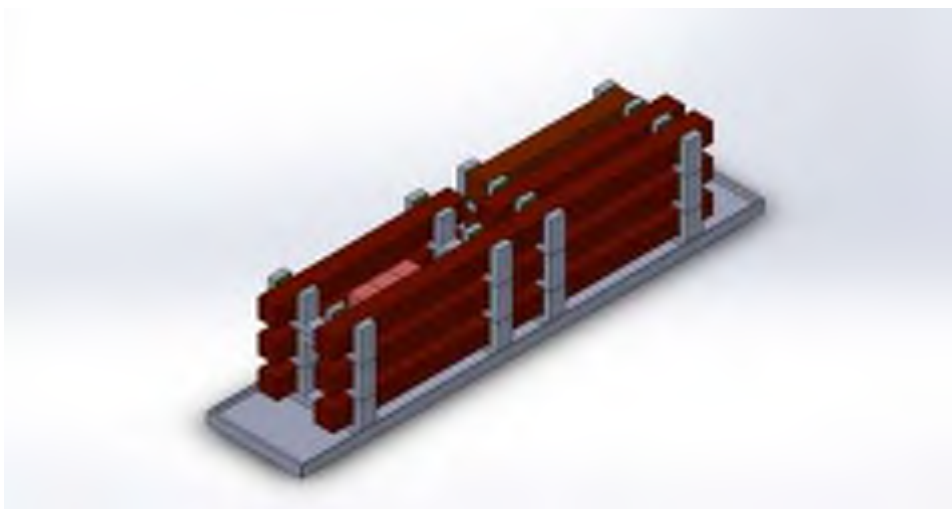
Z-led: 6000 mm

6.5. Frakt

Frakten som diskuterades med EQpack visas i figurerna 55 och 56.



Figur 55. Resultat - Frakt 1



Figur 56. Resultat - Frakt 2

Bilderna är givna ifrån EQpack och visar den frambeskrivna lösningen för hur balkarna och robotarna ska fraktas. Bilderna visar hur containern kan se ut om väggarna är borta. Tanken är att bygga en ställning som matchar balkarna och robotarna. Ett krav är att containern måste kunna ha ett tak som går att öppna eller att lyfta bort. Att för ut dessa balkar från en sida hade sina nackdelar i och med att de är extremt tunga. Om alla balkar är i en ställning blir det svårt att ta dem 1 och 1. Så lösningen med ett öppet takt blev det bästa alternativet. Dock insågs det att minst två 40-fots containrar skulle behöva användas. Det som har tagits i beräkningarna här är robotsystemet och balkarna. Saker som kablar, skruvar, reservkomponenter har inte tagits i beaktande då de ansågs som väldigt enkla att transportera.

6.6. Slutresultat mot mål

Denna del av resultatet använder delresultatet från studien för att studera om hur väl de upprättade målen med projektet uppnåddes.

Slutresultatet visar på en CAD-modell som har gått igenom en produktutvecklingsfas och utvärderats mot de krav som sattes i projektdirektiven. Rent detaljmässigt finns det vissa detaljer som bör gå igenom, se kapitel 8. Dock är det en produktutvecklad CAD-modell som kan visa överliggande konceptet och att det kan fungera. Det vill säga att det uppnår det första målet som sattes för detta projekt.

Återupprepning av de uppsatta målen var följande.

1. Ett övergripande koncept för en konstruktion som medger rörelse för robotarna att röra sig inom ett utrymme för montering av de största armeringsjärn.
2. Montering för automationsstationen ska vara monterbar på en betongplatta inom loppet av 3 dagar.
3. Konceptet ska i nedmonterat läge få plats i en 40-fots container.
4. Visa att med beräkningar att robot kan röra sig till en punkt inom kravet för precision i ihop monterat läge.
5. Möjlig att tillverka med redan testade tillverkningsmetoder.
6. Samtliga komponenter från leverantörer måste vara testade innan.
7. En produktrealiserad CAD-modell som visualiserar tanken med konstruktionen som ska förflytta robotarna och linjerar med projektets riktlinjer och de övriga målen.

Mål 1 och 7 anses uppfyllda då fallstudien resulterar i ett övergripande koncept för konstruktionen. Konceptet för konstruktionen medger tillräckligt med utrymme för att robotarna ska kunna förflytta sig och montera alla typer av armeringskorgar.

Mål 5 och 6 anses även de uppnådda. Då fallstudien visar att det går att tillverka de kritiska detaljerna för konstruktionen och komponenter från leverantörer har verifierats att de har testats innan. CAD-modellens balkar och pelare har diskuterats med tillverkarna IMS teknik och Larsson och Kjellberg för att se om det är möjligt att tillverka dessa detaljer. Detta svarades på i föregående kapitel då de mest kritiska delarna var de stora balkarna. Dessa balkar skulle kunna bearbetas i stora maskiner men är begränsade på en längd av 12 meter. I och med att ingen av balkarna är över detta längdmått och att i konversation med dem har sett detta koncept är möjligt att tillverka uppnår således denna konstruktion målet att vara tillverkningsbart.

Mål 3 är uppfyllt. Det är det enklaste målet att verifiera då parterna ingen av parterna överskrider dimensionerna för en 40-fots container vilket betyder att varje del kan få plats i en 40-fots container. Även en lösning för hur systemet ska packas ner har utvecklats vilket ger ytterligare verifikation på att mål 3 är genomförbart.

Mål 2 är svåra att mäta om det är uppfyllt. Under hela konstruktionsfasen har målet att det ska vara monteringsbart även alltid funnits där. Det betyder att det alltid ska finnas fästelement som är reversibla. Med monteringsbart har det tagits i beaktande att visa av balkarna måste kunna lyftas med en lyftkran. I och med att balkarna går att montera med enbart reversibla förband och i diskussion med Andon har det fattats en godtycklighet att det är möjligt att montera ihop denna konstruktion. Därmed uppfylls målet att det är en monteringsbar konstruktion så länge det finns lyfthjälp i form av kran eller liknande. Detta är något Skanska har räknat med att det går att lyfta balkarna med kran vilket inte ses som ett problem från deras sida.

Slutligen det sista målet nummer 4 är det målet som har varit svårast att mäta till. Detta är då redan förklarat varför och beror på väldigt många faktorer. Under arbetets gång har detta mål mer riktats in mer att undersöka vad som är möjligt att uppnå med de avgränsningarna som avsetts. Den slutgiltiga faktorn blev då i slutändan precisionen för hur fin styrningen som används.

Det slutgiltiga valet av styrningar har en precision som är grövst 1 mm. Det betyder att robotarnas position kan förändras med högst 1 mm åt en given riktning. I och med att det finns 3 rörelseriktningar innebär detta att position kan förändras 1 mm åt vardera riktning. Att använda linjär styrningar är ett koncept som att det är vanligt för andon och kranendonk, det är även det alternativet som finns på prototypen som detta projekt bygger på innan.

Med denna precision på styrningar och att konceptet som valts som påverkar precisions graden allra stört är verifierad funkar anses det att även om målet är svårt att mäta sig till att det ändå kommer kunna gå att använda robotarna effektivt.

7. ANALYS OCH DISKUSSION

Detta kapitel presenterar hur resultatet kopplar till syftet i början av projektet och de krav som identifierades för att uppnå målen.

7.1. Utvärdering av resultat och fallstudie

Utvärdering av resultatet agerar som det slutgiltiga steget i produktutvecklingsprocessen beskriven av Ullman i metod kapitlet. Konceptet som har utvecklats är helt teoretiskt. Därmed går det enbart att rent teoretiskt svara på om konceptet möter kravspecifikations målen och är i linje med projektdirektiven. För att svara på forskningsfrågan och syftet måste målen analyseras och utvärderas hur bra de uppnåddes.

7.1.1. Produktutvärdering – Analys mot kravspecifikation

Tabell 8. Uppnådd kravspec.

Krav	Mål	Godkänt	Enhet	Rational	Uppnått?
Ska kunna möjliggöra ett arbetsutrymme som är tillräckligt stort för en armeringskorg och 3 robotar	20 x 12 x 6	20 x 10 x 4	m	Projektdirektiv	Ja
Stationen ska kunna använda sig av x antal industri robotar	3	3	st	Projektdirektiv	Ja
Ska kunna använda de flexibla kabellängderna som ABB:s drivsystem kan arbeta med	Ja	Ja	Positivt/ Negativt	Projektdirektiv	Ja
Drivsystemet för stationen ska använda sig av ABB:s drivsystem	Ja	Ja	Positivt/ Negativt	Projektdirektiv	Ja
De modulära komponentdelarna till stationen får inte vara större än hänvisade mått	11700 x 2250 x 2200	11701 x 2250 x 2200	mm	För att få plats i en 40 fots-container	Ja
Måste uppge repeterbarhet med noggrannhet av x mm	ej fastställt	ej fastställt	mm	Projektdirektiv	Ej fastställt
Ska kunna medge rörelser för robotarna i x antal rörelsedimensioner	3	3	st	Projektdirektiv	Ja
Ska kunna förflytta robotarna i en viss hastighet	0,5	< 0,5	m/s	Rekommenderad hastighet	Ja
Ska kunna monteras ihop på x antal dagar	2	3	Antal	Projektdirektiv	Ej fastställt
Ska kunna få plats i en tälthall	Ja	Ja	Positivt/ Negativt	Projektdirektiv	Ja
Ska kunna gå att montera på en betongplatta	Ja	Ja	Positivt/ Negativt	Projektdirektiv	Ja
Ska kunna ge utrymme för att en bockningsstation och tillförsel av armeringsjärn ska kunna stå vid sidan	ej fastställt	ej fastställt	mm	Projektdirektiv	Ja
Ska ej använda sig av några fasta förband	Ja	Ja	Positivt/ Negativt	Tillkommer för monterbarhetens skull	Ja
Robotarna ska kunna röra sig oberoende av varandra i X- Y och Z-led	Ja	Till så stor grad att de mekaniska delarna ej krockar med varandra	Positivt/ Negativt	Projektdirektiv	Ja

Ovan visas en tabell som beskriver hur väl konceptet teoretiskt uppnår kraven som formulerades till en början. Konceptet uppnår i princip alla kraven. Det ser således ut som det är möjligt att skapa en sådan här konstruktion. Dock är det vissa krav som är svåra att svara på. Dels är det kravet att hur vida det är möjligt att verkligen komma åt så fin precision som robotsystemet kräver.

Detta undersöktes och ansågs godtyckligt att det skulle fungera om balkarna inte deformerades mer än 4 mm på 12 meter. Dock klarar styrningarna förmodligen en deformation som är större än så. Ta även i beaktande att det är en statisk deformation som talas om då och ingen plötslig dynamisk deformation som sker kort utan det är en deformation som sker över tid och påverkar styrningens bana när den kör. Om balkarna dock har så liten deformation och det är möjligt att använda linjär styrningar som studien påvisar anses det dock vara möjligt att kunna förflytta de rörliga komponenterna med sådan noggrannhet att robotarna kan användas effektivt.

Med linjärstyrningar, tillräckligt styva balkar och ett system som tar parallellitetsfel tros det kunna vara tillräckligt för en robot men för att kunna svara på det måste det även testas. En anledning till varför det är svårt att helt bekräfta är även för att det är svårt att veta vad robotarna klarar. Enda sättet att verkligen veta hur stor skillnad roboten verkligen klarar av är genom att testa systemet.

Det andra kravet för hur lång tid det skulle ta att montera ihop hela gantry:n är även den svår att svara på. För att återgå till listan med de riktlinjer som anses hjälpa en montering enligt DFM-verktyget så är de punkterna som följts i fallstudien fetmarkerade.

- **Minimera antalet detaljer**
- **Minimera antalet unika fästelement**
- Designa produkten med en baskomponent som andra komponenter fäster mot
- Baskomponenten ska inte förflytta sig under montering
- **Försök effektivisera sammanställningen genom att hitta minst antal steg att montera ihop produkten**
- **Undvik monteringsmetoder som är svåra att göra bakvänt eller återanvända (exempelvis knytning)**
- **Designa produkten med tanke på vem eller vad som ska montera ihop produkten**
- **Designa produkter som är symmetriska**
- **Se till att använda sig av fasningar och styrningar för att underlätta införande och inriktningar av detaljer**

Även om majoriteten av riktlinjerna har följts så är det svårt att svara på hur lång tid monteringen kommer ta för att det beror på väldigt många faktorer så som hur mycket resurser som finns, hur många arbetar som är tillgängliga och vad de har för kompetens. I ett drömscenario är det så att det finns oändligt med resurser och personal.

Om det utgår ifrån ett dröm scenario i och med att slutanvändarna Skanska anses inte ha några problem att fylla på med tillräcklig kompetent bemanning eller resurser såsom kranar så uppskattningsvis i diskussion med Andon skulle då de första delarna att montera upp pelarna ta cirka en halvdag. Resterande steg om allting är inmätt skulle då följande gå väldigt snabbt. De förut språkade att om allt gick som det ska kunde allt det mekaniska vara på plats på 2 dagar och då ta en tredje dag för att dra kablar. Att gantry:n då skulle vara helt redo efter tre dagar går bara att spekulera i men det finns en möjlighet. Detta är förutsatt att allt går som det ska och inga problem upptäcks under vägen vid monteringen.

Med detta sagt går det även att diskutera den slutgiltiga dimensionen på gantry:n samt hålfasthetskraven. Det som blev de största hålfasthetskraven för den här konstruktionen blev i slutändan hur mycket styrningarna klarar av att böja på sig utan att tappa precision. Dock var detta ett värde som frambiskuterades vad som ansågs rimligt samt jämförelse med den prototyp som finns idag. Det största kravet på nedböjning blev således under 4 mm på 12 meter vilket ansågs som ett rimligt värde. Detta var då längden på x-led. Dock blev dimensionen på den balken nedsatt till 11500 mm i och med tanken att det ska finnas marginal i en container som har måtten 11700 mm vilket var bland det största innermått på en 40-fots container att få tag på.

Vissa mål i kravspecifikationen anses i efterhand att de förmodligen var för löst satta och på så sätt är de intetsägende och omöjliga att misslyckas med. Dessa två målen är ska kunna få plats i en tälthall och ska kunna monteras på en betongplatta. Rimligen borde målet att få plats i en tälthall omvandlas till att stationen får ej vara större än vissa angivna mått som då är mindre än en tälthall så att konstruktionen får plats inuti. När alternativ för tälthallar undersöktes genom att höra av sig till leverantörer som jobbade med ämnet så var det uteslutande svaret att konstruktionen för tälthallar kan dock specialanpassas efter ändamålet. Graden av hur de kan specialanpassas var beroende från leverantör till leverantör och det är omöjligt för dem att skapa riktning för detta i förhand i och med att det är just special anpassade. Varje special utformning utgick från användningen och nödvändiga mått och så fick leverantören återkomma och se om det är genomförbart för dem eller icke. Detta landar i att det blir mätdata som leverantören får stå för och det beror på om de säger ja eller nej. Nu hittades en leverantör som menade på att de skulle kunna bygga en sådan här tälthall och därmed besvarades kravet att det skulle kunna gå.

Det andra kravet som är svagt mätbart är att det ska kunna monteras på en betongplatta. Det syftar till att stationen ska sitta fast i marken egentligen men nu är det svagt mätbart i och att det finns så många varianter att göra detta på att det är omöjligt att misslyckas med det. Målet borde förmodligen göras om till något i stil med hur mycket stationen får förflytta sig i förhållande till marken och hårt spänt stationen ska vara. Vid utvärdering av resultatet så tror författaren dock inte att det hade spelat så stor roll då det konceptet som har tagits är ett väldigt vedertaget metod att montera på en betongplatta och det förmodligen med anledningen att den redan fungerar bra. Hur det här målet än hade formulerats så hade konceptet för att fästa stationen på en betongplatta förmodligen se likadant ut.

7.1.2. Övriga frågor som studien besvarar

En fråga som kan anses relevant till forskningen är vad är den begränsande faktorn för hur stor en sådan här station kan vara. Det är relevant för det kan vara intressant att veta för andra applikationer hur stor station går att bygga.

Nämnt i teori kapitlet är det svårare att uppnå fin precision ju större konstruktionen blir. Dock är den begränsande faktorn i detta fall kabellängderna till robotsystemet. Maxlängden för kablarna används i detta koncept och om konstruktionen skulle bli större innebär det att kablarna inte skulle räcka till för åklängden. Därmed kan konstruktionen inte bli märkbart mycket större än den dimensionen som angivits i föregående kapitel.

7.2. Utvärdering mot avgränsningarna och resurskraven

Denna studie har en hel del avgränsningar. Detta är till stor del på grund av att omfattningen kräver det och att utan avgränsningarna skulle detta arbete ha potentialen att bli hur stort som helst. Avgränsningarna som gjorts är även ett sätt att försöka behandla vart gränsen går för rimligt realistiskt genomförbart.

Med det sagt så finns det vissa avgränsningar och direktiv som anses intressanta att studera. Till en början är det kravet att rikta sig in mot ISO-Containrar och att stationen ska kunna få plats i en sådan. Detta är ju till stor del enbart för att använda Containrarna som ett medel för transporten. Detta syftar helt till att det som egentligen är intressant är att förflytta konstruktionen från plats till plats.

Till en början av studien arbetades det helt öppet med inga avgränsningar för transport. Detta insågs under vägens gång att möjligheterna är väldigt många i sådana fall och det var svårt att hitta vad som exakt är godtyckligt vad som gäller för transport. Egentligen är strävan att ha så kort, enkel och smidig transport som möjligt. Dock är detta svårt att mäta och jämföra med vilket gjorde att det trattades ner till att jobba med en ISO-Container för att även om det intespecificeras hur lång tid det kommer ta mellan transporterna så är det en så pass bekant och vanlig lösning att det anses rimligt för transport. Dock hade det varit intressant att studera fler fraktnalternativ som inte är bundna till en ISO-Container.

En av avgränsningarna som blev som en påföljd av att använda sig av ISO-Containrar var även att stationen skulle vara monteringsbar. Detta är något som nödvändigtvis inte behöver vara ett krav för att kunna få plats i en monteringsstation och producera produkter som är större än vad som ryms i fraktcontainrar. Exempelvis skulle det gå att kunna använda sig av teleskoplösningar där stationen skulle kunna vara ihopfällbar på ett sätt. Eller kanske strävat efter att göra en fabrik som är mindre än produkten som den producerar.

Dessa koncept och lösningar avgränsades snabbt bort av samma anledning som det avgränsades till att fokusera på en ISO-Container. Men även också för att det skulle innebära att studera lösningar där det finns få expertis om. Då mestadels av studien bygger och på att samla in erfarenhet och fakta via intervjuer och då det ansågs finnas lite information att inskaffa som bygger på erfarenhet angående exempelvis en ihopfällbar fabrik ansågs då att resultatet av den studien skulle ha högst tvivelaktigt resultat. Det skulle innebära att lösningen för konceptet skulle bygga på en väldigt stor osäkerhet.

Ett en annan punkt som uppstod i diskussion för att montera denna konstruktion var att undvika att använda shims under monteringen. Argumentet för detta var att det skulle underlätta och göra monteringen snabbare. Detta var dock inget krav men något som strävades efter att undvika. Slutresultatet bygger på att det kommer att slippa använda shims vid montering men om det behövs kan det vara vid den första monteringen som benämns i resultatet. De modulära delarna sedan kan ha kvar shims bitarna och slipper sedan att tänkas på under de påföljande monteringarna.

7.3. Utvärdering av arbetsmetod och trovärdighet i studie

Den övergripande processen för arbetet har varit att arbeta efter en produktutvecklingsmodell som är ämnad för mekanisk konstruktion. Till en början ansågs det som ett lämpligt och nästan självklart val att arbeta ifrån då ämnet i sig behandlar mekanisk konstruktion till stor utsträckning.

Författaren för detta arbete upptäckte dock att det var svårt att följa processen steg för steg såsom den är angiven enligt litteraturen. Detta var för att uppgiften i sig riktade sig till ny utveckling och studerade mycket vad som är möjligt. Att undersöka vad som är möjligt gjorde att nya insikter för utvecklingen av konceptet tillfördes hela tiden under projektets gång och därmed var det då tvunget att gå tillbaka till vissa moment och redigera dem allt efter mer data tillfördes till arbetet. Detta gjorde att processen inte flöt på så bra och smidigt och gick att avsluta en fas för att gå över till nästa utan det hoppades ständigt mellan de olika produktutvecklingsmomenten.

Det var även en del yttrefaktorer som spelade roll för processen som gjorde det svårt att föra projektet exakt linjärt. Exempelvis då detta arbete byggde även på kompetens som satt besittande hos erfarna personer inom relevant ämne var datainsamlingen även tvungen att anpassas efter tillfällena som passade dem. Tillfällena som passa intervjuobjekten behövde inte nödvändigt matcha med vilken fas som var mest aktuell för tillfället.

Att utgå studien ifrån produktutvecklingsmetodik är inget författaren ställer sig tveksam emot men förmodligen skulle arbetet gynnats av en metodik som bygger mer på att arbeta efter cykler och iterativa processer som utgår ifrån att jobba efter cykler och där det tillåts att nya insikter tillkommer. Detta metoder benämns som kan benämnas som agila metoder där det jobbas det tillåts att jobba mer flexibelt och i cyklar. Att jobba efter denna metod är nog som kom till insikt under projekt och var svårt att ändra produktutvecklings metodik mitt i arbetet. Dock så känns resultatet tillfredställande trots allt men projektet hade förmodligen gynnats av att det hade sluppit gå tillbaka i olika moment, det hade liknat verkligheten mer och författaren skulle rent tidsmässigt att det nog sparat in lite mer tid då processer skulle sluppits göra om i onödan.

7.3.1. Repeterbarhet av studie

Denna studie har eftersträvat att jobba efter så stor objektivitet som möjligt. Dock då som benämnt ovan har en del yttrefaktorer spelat in och processen har inte följts helt linjärt i enlighet med processen som var tanken från början. Därmed kan det påverka hur repeterbar studien är. Att arbetsmetoden ska vara helt repeterbar och exakt samma resultat uppnås igen är en förutsättning för vetenskaplighet.

Då en arbetsprocessen påverkades av en del yttre faktorer och processen blev rätt dynamiskt kan det vara svårt att upprepa denna process exakt och få exakt samma resultat. Dock så är detta en studie som grundar sig i ny teknikutveckling detta ser författaren att det är svårt att göra ett hundra procent repeterbart utvecklingsprojekt där mycket expertis med olika parter samt många viljor och satsningar och yttre faktorer är inblandade att på samma sätt få samma resultat. Exempelvis är utvecklingen av ny teknik för detta projekt är på ett sätt bundet till att diskuteras med flera olika parter och erfarenheter inom relevanta områden. Dessa diskussioner kan förmodligen leda till andra insikter exempelvis på grund av att intervjuobjekten till stor del även jobbar med utveckling och kan få nya insikter vilket leder till att de svarar annorlunda om samma studie skulle upprepa sig som i sin tur leder till en annan variant av resultat.

Detta resultat är även beroende av den teknik som finns idag. Om studien skulle upprepa sig om ett par år ser resultatet förmodligen annorlunda ut då tekniken är under ständig utveckling.

7.3.2. Intervju och avstämning som verifikation för resultat.

En central del av arbetet utgår ifrån intervjuer. Även en del av målen landar i att intervjuer där en del diskuteras om det går att genomföra som måttstock om det går att realisera. Detta kan anses som att det finns en risk i att en del av resultatet är beroende på trovärdigheten av intervjuobjekten.

Intervjuobjekten som har valts ut dock är till stor del representanter ifrån företag som är ledande inom den teknik presenteras och används i denna studie. Exempelvis SKF för mekaniska styrningar och drivningar, Andon inom Gantry-uppbyggnad, ABB och robotdalen inom robotsystem. Därmed anses det i många fall att det inte går att få bättre expertis som intervjuobjekt och de svar som har angetts därmed setts väldigt tillförlitliga.

En del frågeställningar har varit svåra att även uppnå utan något annat mätbart sätt en att diskutera fram en lösning och verifiera att den går med avstämning och intervju. Exempelvis att undersöka om det går att tillverka denna konstruktion och hur det i sådana fall ska göras? Detta gjordes med att stämma av med två maskinverkstäder IMS maskin teknik och Larsson och Kjellberg. De som kontakades var verkstadsansvariga och kunde verifiera att det går att tillverka. Den enda alternativa metod som sågs för att undersöka detta på är faktiskt gå och tillverka konstruktionen på riktigt. Detta innebär en stor ekonomisk investering i jämförelse med vad som utdelas tillbaka då det förmodligen ger samma utdelning som det först nämna alternativ av metod som inte kräver några nämnvärda resurser. Detta exempel är liknande för en del frågeställningar såsom undersökning av tälthall, tiden för montering, kabellängderna för robotsystemet och konceptet i helhet.

Att en stor del av resultatet är baserat på intervjuer är det dock inte så förundransvärt. Detta är i och med att som ovan nämnd skrivit har varit i många fall varit bundet till det utan att göra en väldigt stor ekonomisk investering. Det personer som har intervjuats har eftersträvat att vara den kompetensen som anses som bäst inom området, det har även försökts att verifieras med olika källor över vad som är rimligt än enbart bara med en källa.

7.4. Analys mot problem och frågeställning

Syftet med detta arbete var att undersöka hur en transporterbar automationsstation kan se ut med avgränsningar mot att kunna transporteras med standardiserade transportlösningar?

Frågeställningen som ställdes i början var:

- Hur ser en automationsstation ut som kan transporteras med en standardiserade lastbehållare och effektivt använder de kraftigaste industrirobotarna samt framställer produkter som är för stora för kraven av en standardiserad transportlösning?

Syftet anses uppnått då ett konceptet som utvecklades under fallstudien anses genomförbart och därmed visar det ett koncept som kan verka som en transporterbar automationsstation.

Frågeställningen för detta arbete grundar i att undersöka om det är möjligt att bygga en sådan här automationsstation. I och med att det är svårt att svara helt på frågan utan att verifiera kravet på repeterbar noggrannhet går det inte helt att svara på frågan om det är möjligt. Teoretiskt sätt så är det möjligt och med erfarenheten från de konstruktörer som har kontaktats och rådfrågats under arbetets gång så pekar det mesta på att i praktiken kommer det även att fungera. Så fallstudien svarar på hur denna station kan se ut och de kan transporteras med standardiserade lastbehållare även fast det som fraktas är utanför kraven av standard transportlösning.

Frågan är bara om de åtgärder som har gjorts för att uppnå en perfekt station kommer se ut helt som det gör i det här arbetet eller om det måste ändra sig eller läggas till fler funktioner för att få en tillräckligt pålitlig konstruktion. Förmodligen är det så att det måste ändras en aning. Nästa steg är som tidigare nämnt att testa. Möjligen försöka bygga en station som är häften så stor som bygger på de teoretiska principer som redovisats i det här arbetet?

De flesta komponenter, lösningar och detaljer som har redovisats i detta arbete är plockade från redan existerande lösningar som finns. Det är helheten i sig när allting är sammanplockat som hela konstruktionen blir väldigt unik. Under produktutvecklingen har det funnits idéer för olika konstruktionslösningar som skulle kunnat valts och gjort att hela slutresultatet kunde sätt helt annorlunda ut. Dock har de beslutet tagits varit de som pekat mot att vara mest säkra och ha mest erfarenhet bakom. Vilket gör att denna utformning som har valts är den där flest komponenter har bevisat sig att fungera förut, det vill säga väldigt lite risktagande bakom. För att svara på frågan går det förmodligen alltså att utforma denna konstruktion på flera olika sätt men utformningen som för denna variant är den med minst risktagande då det ansetts onödigt att uppfinna hjulet återigen på de ställen där lösningar finns. Detta är också med tanke på att studien bygger på till största del kvalitativ data och så stor säkerhetsfaktor som möjligt eftersträvs i sådana fall.

Exempelvis så har är kravet för nedböjning 4 mm antagligen väldigt hårt satt och att styrningarna förmodligen klarar en större deformation. Dock har det inte funnits relevant data som pekar på detta och därför har det noggranna kravet satts.

Det finns även vissa delar i denna fallstudie som kan anses som överflödiga för att svara på forskningsfrågan. Exempelvis att den ska använda sig av tre stycken industri robotar. Det går att möjligtvis att bara använda en robot till en annan applikation.

En intressant aspekt är även hur bra denna konstruktion kommer att påverka byggbranschen. Stationen avser att utveckla till det bättre, att slippa logistiska kostnader och resurs hantering från prefabricering samt att minska arbetsbelastningen förslitningsskador för de som arbetar med armeringskorgar idag samt att minska arbetstiden och processen för arbetet. Frågan är dock hur mycket det kommer att bli. Detta är något som initialt till en början verkade intressant för projektets gång. Dock ju mer projektet arbetades med verkade det inte längre relevant för studien eller för att besvara forskningsfrågan eller syftet. Arbetet är inte till för att undersöka om det kommer bli bättre eller inte för byggbranschen. Bakgrunden för arbetet är redan lagt så att det är givet att det kommer bli fördelar om det går att utveckla stationen. Detta arbete har då haft i fokus hur stationen ska utvecklas och det grundar sig i en förutsättning att det kommer resultera i att det kommer bli bättre.

8. SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER

Nedanstående kapitel beskriver slutsatsen för projektet och om hur väll resultatet uppnådde vad som var önskat från början. Det beskriver även rekommendationer för fortsatt arbete.

Tanken med detta arbete var att komma längre än ett koncept. Syftet var att se om det är realiserbart att bygga en sådan här produkt och därför sattes målet att se om det är möjligt att tillverka. CAD-modellens balkar och pelare har diskuterats med tillverkarna IMS teknik och Larsson och Kjellberg för att se om det är möjligt att tillverka dessa detaljer. Detta svarades på i föregående kapitel då de mest kritiska delarna var de stora balkarna. Dessa balkar skulle kunna bearbetas i stora maskiner men är begränsade på en längd av 12 meter. I och med att ingen av balkarna är över detta längdmått och att i konversation med dem har sett detta koncept är möjligt att tillverka uppnår således denna konstruktion målet att vara tillverkningsbart.

Således anses konceptet att det är möjligt att genomföra med de projektanvisningar som har angetts. Detta är dock enbart koncept och har enbart visats att det fungerar teoretiskt. Därmed kan det finnas praktiska anledningar som är svåra att identifiera i förhand som kan tala emot. Studien är genomförd på så sätt att det är inte finns särskilt mycket teoretiskt som säger emot där även det inte identifieras några okända faktorer som motsäger att konceptet inte är genomförbart.

Detta arbete har gått från en idé om ett koncept för att se om det är möjligt att produktrealisera. Värde av detta arbete är att det har tagits från ett koncept med många öppna frågor och landat i en slutsats är att det finns en möjlighet att genomföra detta. Även om hela idén med en monterbar automationsstation är väldigt ny och unik där det har funnits många tvivel på om det går att tillverka möjligt att bygga ihop med många konstruktionslösningar som redan är befintliga och använda sig av teknik som finns. Många av de komponenter och tekniker som beskrivs i denna rapport tänjer dock på gränserna vad som är möjligt att tillverka och göra. Exempelvis används några av de starkaste skenorna från SKF, de är på gränsen att det är möjligt att tillverka i maskinerna hos de leverantörer som har pratats med och de är på gränsen att ABB:s robotsystem klarar det. Dock så är det ändå inom ramen av fullt möjligt. I och med att tekniken som är beprövad är på gränsen att det klaras av i dagsläget är förmodligen en av anledningarna varför inte liknande koncept har utvecklats tidigare och genomförts då tekniken har varit begränsande innan.

Dock finns det detaljer att vidare kolla på för att verkligen verifiera att idén med en sådan här stor automationsstation är fullt möjligt. Det intressanta är att undersöka om konceptet för felupptagning i parallellitet är tillräckligt för att uppnå repeterbar noggrannhet. Nästa steg är att det bör testas i praktiken.

Ytterligare områden som bör studeras och dubbelkollas är hållfasthetsberäkningarna. Även om stor del av arbetet har ägnats till att beräkna dessa balkar bör det vara fler källor som studerar hållfastheten. Det finns även områden inom hållfastheten som ej tog till beaktandes under detta arbete. Bland annat var det att beräkna egen frekvensen för konstruktionen. Detta gjordes ej på grund av att det dels var svårt att identifiera hur egenfrekvensen skulle uppstå och kunskap för dessa beräkningar saknades. Dessutom är rörelsemönstret för robotarna ej helt bestämda vilket gör det ytterligare svårare att beräkna hur egenfrekvensen ska se ut.

Ett annat område som borde studeras vidare är även flänsförbandens utformning. Under detta arbete gjordes konstruktionen som sådan att det finns en del designfrihet att utforma flänsförbanden. Anledningen varför flänsförbanden inte blev helt utformade var för att tiden inte räckte till. Det som menas med utformning av flänsförbanden är stort sett vilken skruv som ska användas samt hur många skruvar som ska användas i respektive förband. I och med att tid ej fanns för detta gjordes lösningen att utforma konstruktionen att det finns en hel del frihet att utforma förbanden senare.

Det bör även räknas noggrannare på växellådan för den som styr drivningen i z-led. Detta är med tanke på att den växellådan måste vara självlåsande när systemet står still. Detta är fullt möjligt med den modellen av växellådor som har valts dock spelar det större roll vilken modul och kuggantal som väljs för att driva det i z-led. Beräkningar för att få fram rätt kuggantal på växellåda och drivning i z-led för att få det i rimlig hastighet samt om det är självlåsande hans inte med att göra i detta arbete. Dock verifierades det med tillverkaren att det gick att göra bara rätt kvot mellan kuggantal och utväxling valdes.

Ytterligare detaljområden som bör studeras vidare är hur vissa saker ska fästas på konstruktionen. Exempelvis hur kabelkedjan ska fästas samt om det ska finnas en kabelstege längspelarna. Dessa konstruktionsområde anses inte som kritiska för att uppnå målet och har därför inte helt studerats hur de ska se ut. Det har heller inte studerats då det krävs mer data att ge till leverantören för kabelkedjor för att få en ritning på kabelkedjorna. Detta är data som först kan bestämmas när tidigare detaljer har bestämts.

Vidare undersökningar efterfrågas även att se om denna konstruktion går att göra i ett annat material än stål. Exempelvis om det går att göra ramverket i ett kolfiber material. Detta betyder att ramverket skulle bli väldigt mycket lättare och på sådant sätt inte utsättas för lika stränga hållfasthetskrav.

Problemet är att det är en stor ekonomisk investering för att dementera om det är koncept som kommer att fungera eller inte. En sådan investering är för stor att inte ha en garanti att inte ge avkastning tillbaka. Därmed en anledningen för att det än så länge bara är koncept som pekar på att det fungerar men det har inte fått ett genomslag ännu.

Nu när det finns ett helhetskoncept kanske det går att göra mindre studier som inriktade på vissa delar med mindre omfattning men som ger kvantitativ data till fortsatt arbete för att förhoppningsvis en dag känna att det finns tillräckligt med data att genomföra projektet praktiskt.

Ett intressant område är även att studera andra applikationer för denna station än bara att använda sig av att tillverka armeringskorgar. Teorin som hänvisas till i början av denna rapport anser att just byggbranschen skulle kunna ha stora fördelar med att använda sig av mobila fabriker. Förmodligen skulle stationen kunna modifieras och användas till andra applikationer. Det är lite tanken med att göra forskningsfrågan till ett generellt slag.

Stationen skulle kunna modifiera verktygen som de jobbar med samt kunna ändra dimensioner och anpassas till en annan lösning. Exempelvis för att istället jobba med ett verktyg som najas och greppar skulle kunna använda sig till att svetsa ihop detaljer. Vidare forskning för detta område hade varit intressant och även kunnat bidra till att utveckla produktionssystem inom byggbranschen.

Studien har även grundad sig i byggbranschen. Ytterligare studier skulle även kunna studera om transportabla fabriker skulle vara gynnsam i andra sammanhang. Vad för typ av bransch det skulle vara som exempel är dock svårt att säga.

9. KÄLLFÖRTECKNING

- ABB. (den 15 Oktober 2008). *ABB IRB 4600 - IRB 4600 Launch Brochure*. Hämtat från <http://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/irb-4600> 2018
- ABB. (2018). *ABB - IRC5*. Hämtat från <http://new.abb.com/products/robotics/controllers/irc5> 2018
- ABB. (den 15 February 2018). *ABB IRB 4600 - IRB 4600, data sheet*. Hämtat från <https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK104295D2969&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch> 2018
- Andon. (2018). Konstruktionsmöte angående gantry konstruktion.
- Andon Robotics. (2018). *Andon Robotics - Applikationer*. Hämtat från <http://www.andonrobotics.se/se/applikationer/enstycksproduktion>
- Aratron AB. (u.d.). *Aratron AB - Produkter - Kulskruvar*. Hämtat från <https://www.aratron.se/sv/vara-produkter/kulskruvar/> 2018
- Autodesk CAM. (2014). *Fundamentals of CNC-Machining*.
- AZoRobotics. (2018). *AZoRobotics - Flexmotion series gantrys*. Hämtat från <https://www.azorobotics.com/equipment-details.aspx?EquipID=271> 2018
- Bark, L. (2009). *zoomin - Produktutveckling - Kravspec*. Hämtat från <http://zoomin.idt.mdh.se/course/Produktutveckling/kravspec.asp> 2017
- BE group. (2012). *Handbok Armering i Grunden*. Hämtat från http://www.begroup.com/upload/Sweden/Broschyrer/Armeringshandboken_2012_low.pdf 2018
- Begroup. (April 2012). *Lagersortiment armering*. Hämtat från <http://www.begroup.com/upload/sweden/prislistor/armering/lagersortiment%20armering%20april%202012.pdf> 2017
- Bell, J. (2009). *Introduktion till forskningsmetodik*. Lund: Studentlitteratur AB.
- Carlsson, J. (2015). Universitetslektor .
- Carlsson, T. (den 16 Mars 2018). Intervju om tältbygge.
- Celsa-group. (u.d.). *Celsa steel service - Armeringskorgar*. Hämtat från <https://celsa-steelservice.se/produkter/> 2018
- Container tjänst. (u.d.). *Containertjänst - 40 fots container*. Hämtat från <http://www.containertjanst.se/vara-containers/40-fot-high-cube/> 2018
- Dahlberg, T. (2001). *Teknisk hållfasthetslära*. Lund: Studentlitteratur AB.
- Dahlen, T. (den 15 Februari 2018). Intervju - Kabeldragning.
- Engineering360. (u.d.). *Globalspec - Rack and Pinion Gears Information*. Hämtat från https://www.globalspec.com/learnmore/motion_controls/power_transmission/gears/rack_pinion_gears 2018
- Fagerström, B. (den 31 Januray 2017). Föreläsning inom Forskningsmetodik. Eskilstuna.
- Hedin, M. (den 9 Mars 2018). Site manager - Hexagon Labb Eskilstuna.
- Holme, I. M., & Solvang, B. K. (1996). *Forskningsmetodik - Om kvalitativa och kvantitativa metoder* (3:e upplagan uppl.). Oslo: TANO A.S.
- Holst, P. (2018). Diskussion om konceptlösningar.
- Jönsson, N. (den 6 Mars 2018). konstruktion och tillverkning.
- Kuric, I., Kosinar, M., & Cisar, M. (2012). MEASUREMENT AND ANALYSIS OF CNC MACHINE TOOL ACCURACY IN DIFFERENT LOCATION ON WORK TABLE. *Proceedings in Manufacturing Systems*.
- Mats, G. (Februari 2018). Intervju - skenstyrningar.

- Nationalencyklopedin. (2018). *Ne.se - finita elementmetoden*. Hämtat från <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/finita-elementmetoden> den 20 Mars 2018
- Olexa, R. (2005). *Modern machine shop - Keeping accuracy within reach*. Hämtat från <https://www.mmsonline.com/articles/keeping-accuracy-within-reach> 2018
- Pan, M., Linner, T., Pan, W., Cheng, H., & Bock, T. (den 7 February 2018). A framework of indicators for assessing construction automation and robotics in the sustainability context. *Journal of cleaner production*, ss. 82-95.
- Petterson, L. G. (den 18 January 2018). Skanska Gantry.
- PMH. (u.d.). *PMH - kättingtelfer*. Hämtat från <https://www.pmh.se/kito-royal-er2-katting-telfer-krokmonterad-telfer>
- Rago, J. (2011). *Heidenhien - Accuracy, Repeatability and Resolution – What's the Difference?* Hämtat från <http://www.heidenhain.us/resources-and-news/accuracy-repeatability-and-resolution-whats-the-difference/> 2018
- Rauch, E., Dominik, M. T., & Dallasega, P. (den 26 Juni 2015). Mobile Factory Network (MFN) – Network of Flexible and Agile Manufacturing Systems in the Construction Industry. *Advanced material research*.
- Robotdalen. (2017).
- SBUF & Skanska. (Maj 2012). *Sammanfogning och fixering av armering*. Hämtat från http://vpp.sbuf.se/Public/Documents/ProjectDocuments/ab8fa348-b0cb-40fd-b8f1-71075c923cc6/FinalReport/SBUF_12525_Slutrappport%20-%20Sammanfogning%20av%20armering%20120531.pdf 2018
- Skanska. (2017). *Skanska.se*. Hämtat från <https://www.skanska.se/om-skanska/press/nyheter/robotar-effektiviserar-arbetsplatsen/> 2018
- SKF. (2018). Mejlkonversation med SKF.
- SKF. (u.d.). *SKF - Profile rail guides LLT*. Hämtat från <http://www.skf.com/group/products/motion-technologies/linear-guides-and-tables/profile-rail-guides/profile-rail-guide-llt/index.html> 2018
- Spiksäkert. (2010). <https://spiksakert.wordpress.com/2010/05/30/mer-isolering-och-armering/>. Hämtat från <https://spiksakert.wordpress.com/2010/05/30/mer-isolering-och-armering/> 2018
- Structor. (2017). Konstruktionsmöte angående stålkonstruktioner.
- Stålbyggnadsinstitutet. (2013). *Detaljhandbok*. Stockholm.
- Svenska Betong. (2017). *Svensk betong - Om betong*. Hämtat från <https://www.svenskbetong.se/om-betong>
- technopedia. (2018). *Automation*. Hämtat från <https://www.techopedia.com/definition/32099/automation> 2018
- Transportstyrelsen. (2018). *Lasta Lagligt vikt- och dimensionsbestämmelser för tunga fordon*. Hämtat från https://transportstyrelsen.se/globalassets/global/publikationer/vag/yrkestrafik/lasta-lagligt/tran-045-lasta_lagligt_sv_webb_2018-06-01.pdf
- Ullman, D. G. (2010). Professor Emeritus. i *The Mechanical Design Process* (4:e upplagan uppl.). New York: McGraw-Hill.
- Ullrich, K. T., & Eppinger, S. D. (2012). *Product Design and Development* (5th uppl.). New York: McGrawhill.
- Viebke, L. (den 15 Juni 2003). *Carbon Strikes - Grundläggandehållfasthet och materiallära*. Hämtat från <http://www.carbontrikes.com/komposit/index.html>
- Wiktorsson, M. (2017). Föreläsning för Theory/ Methods within product and production development. Eskilstuna.

10. BILAGOR

Bilagor som följer i detta arbete är följande:

Bilaga 1 – Innehållsförteckning bilagor

Bilaga 2 – Gantt-schema

Bilaga 3 – Funktionsanalys

Bilaga 4 – Produktblad IRB-4600

Bilaga 5 – Hållfasthetsberäkningar

Bilaga 6 – Beräkning av växellåda

Bilaga 7 – Förstorad bild av kabeldragning

Bilaga 8 – FEM Analyser

Bilaga 9 – Elementarfall

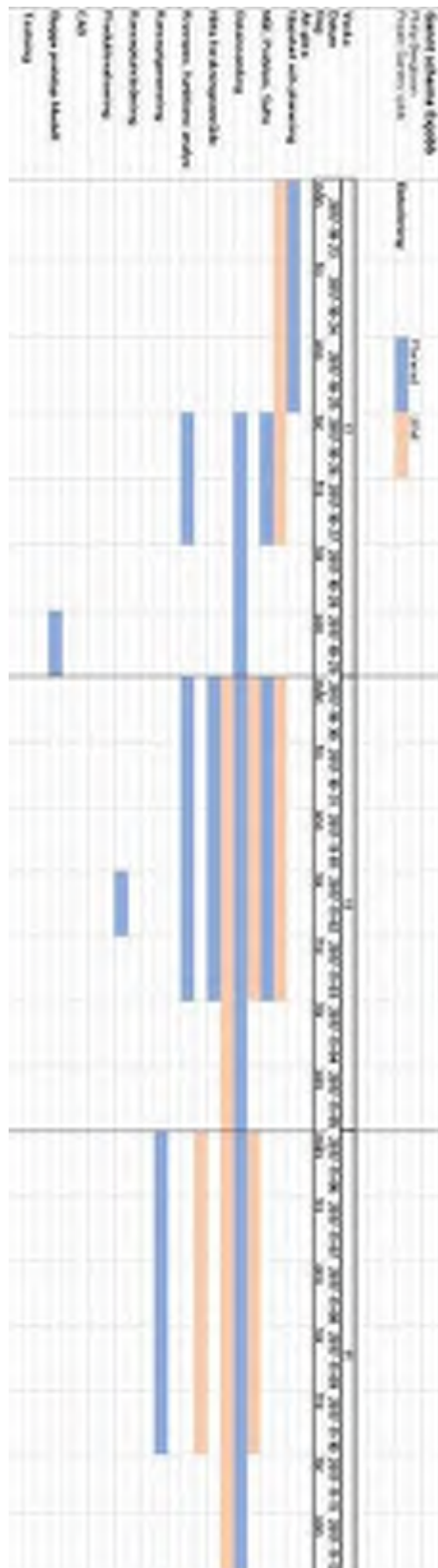
Bilaga 10 – Specifikationer IRC5

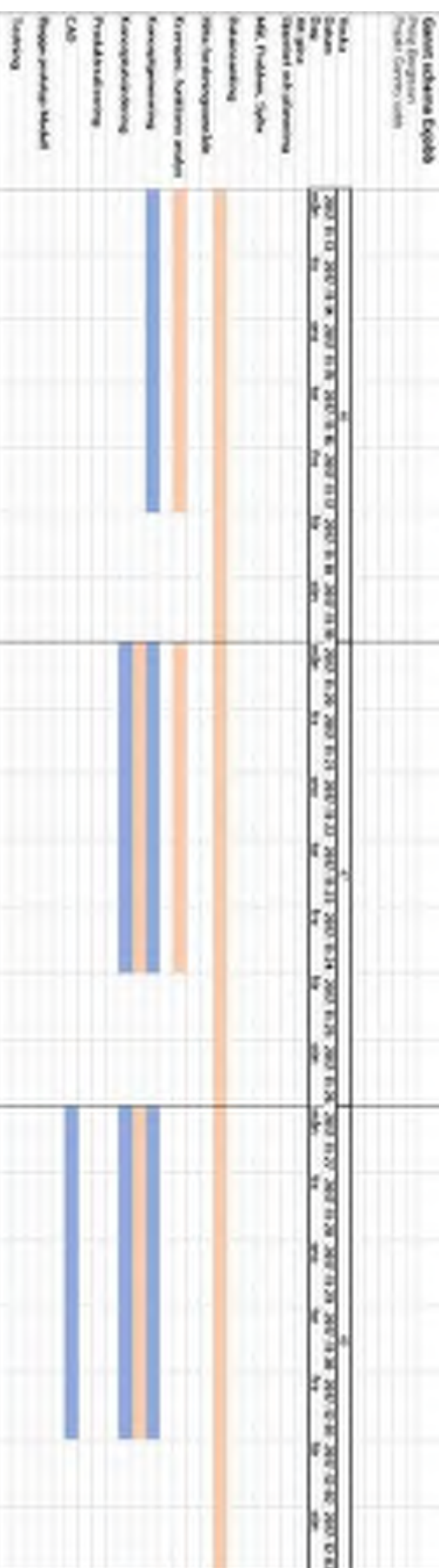
Bilaga 11 – Anteckningar och diskussionspunkter från intervjuer

1. BILAGA 1 - INNEHÅLLSFÖRTECKNING BILAGOR

1.	BILAGA 1 - INNEHÅLLSFÖRTECKNING BILAGOR	I
2.	BILAGA 2 - GANNT-SCHEMA.....	II
3.	BILAGA 3 – FUNKTIONS ANALYS	X
4.	BILAGA 4 – PRODUKTBLAD IRB-4600	XI
5.	BILAGA 5 - BERÄKNINGAR	XIII
6.	BILAGA 6 - BERÄKNING AV VÄXELLÅDA.....	XXXVI
7.	BILAGA 7 – FÖRSTORAD BILD AV KABELDRAGNING	XXXVII
8.	BILAGA 8 – FEM-ANALYSER	XXXVIII
9.	BILAGA 9 - ELEMENTARFALL.....	XLIII
10.	BILAGA 10 – STYRSYSTEM IRC5	XLVIII
11.	BILAGA 11 – ANTECKNINGAR OCH DISKUSSIONS PUNKTER FRÅN INTERVJUER..	LII

2. BILAGA 2 - GANNT-SCHEMA

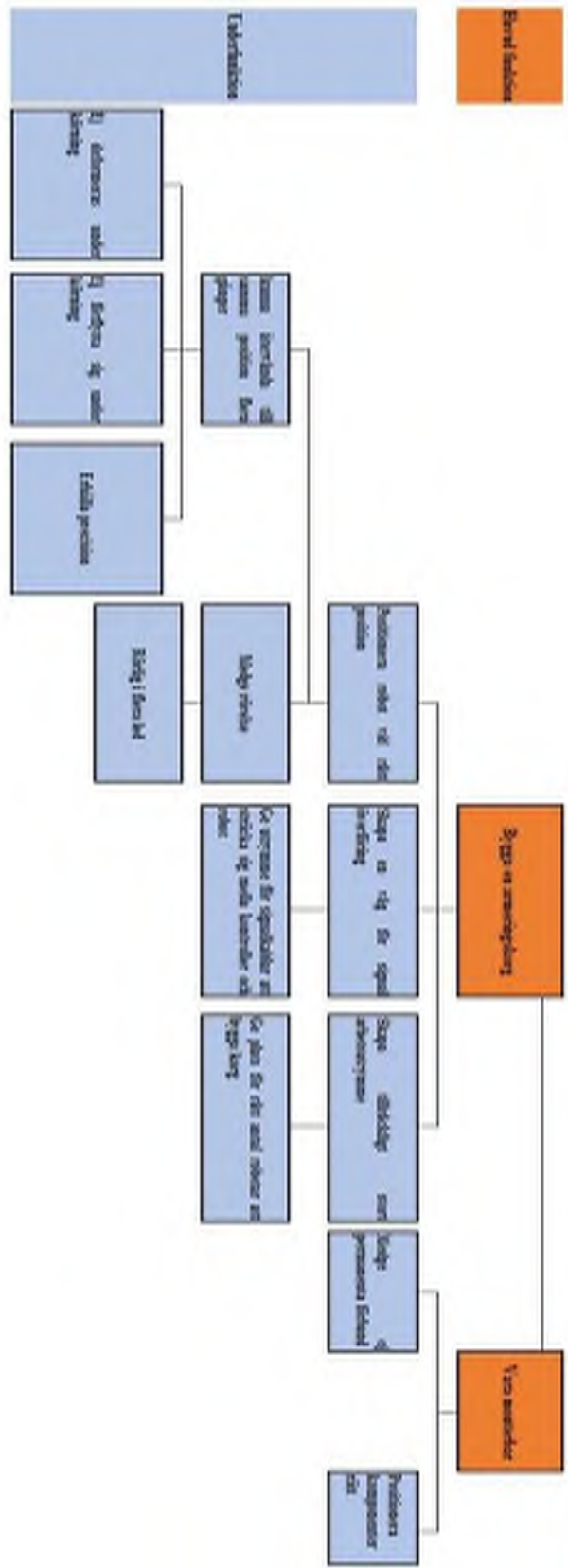




Gantt diagram: Project																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													
Project description																													

Student schedule English		Monday		Tuesday		Wednesday		Thursday		Friday		Saturday		Sunday	
Time		2024-01-01	2024-01-02	2024-01-03	2024-01-04	2024-01-05	2024-01-06	2024-01-07	2024-01-08	2024-01-09	2024-01-10	2024-01-11	2024-01-12	2024-01-13	2024-01-14
08:00 - 09:00															
09:00 - 10:00															
10:00 - 11:00															
11:00 - 12:00															
12:00 - 13:00															
13:00 - 14:00															
14:00 - 15:00															
15:00 - 16:00															
16:00 - 17:00															
17:00 - 18:00															
18:00 - 19:00															
19:00 - 20:00															
20:00 - 21:00															
21:00 - 22:00															
22:00 - 23:00															
23:00 - 24:00															
24:00 - 25:00															
25:00 - 26:00															
26:00 - 27:00															
27:00 - 28:00															
28:00 - 29:00															
29:00 - 30:00															
30:00 - 31:00															
31:00 - 32:00															
32:00 - 33:00															
33:00 - 34:00															
34:00 - 35:00															
35:00 - 36:00															
36:00 - 37:00															
37:00 - 38:00															
38:00 - 39:00															
39:00 - 40:00															
40:00 - 41:00															
41:00 - 42:00															
42:00 - 43:00															
43:00 - 44:00															
44:00 - 45:00															
45:00 - 46:00															
46:00 - 47:00															
47:00 - 48:00															
48:00 - 49:00															
49:00 - 50:00															
50:00 - 51:00															
51:00 - 52:00															
52:00 - 53:00															
53:00 - 54:00															
54:00 - 55:00															
55:00 - 56:00															
56:00 - 57:00															
57:00 - 58:00															
58:00 - 59:00															
59:00 - 60:00															
60:00 - 61:00															
61:00 - 62:00															
62:00 - 63:00															
63:00 - 64:00															
64:00 - 65:00															
65:00 - 66:00															
66:00 - 67:00															
67:00 - 68:00															
68:00 - 69:00															
69:00 - 70:00															
70:00 - 71:00															
71:00 - 72:00															
72:00 - 73:00															
73:00 - 74:00															
74:00 - 75:00															
75:00 - 76:00															
76:00 - 77:00															
77:00 - 78:00															
78:00 - 79:00															
79:00 - 80:00															
80:00 - 81:00															
81:00 - 82:00															
82:00 - 83:00															
83:00 - 84:00															
84:00 - 85:00															
85:00 - 86:00															
86:00 - 87:00															
87:00 - 88:00															
88:00 - 89:00															
89:00 - 90:00															
90:00 - 91:00															
91:00 - 92:00															
92:00 - 93:00															
93:00 - 94:00															
94:00 - 95:00															
95:00 - 96:00															
96:00 - 97:00															
97:00 - 98:00															
98:00 - 99:00															
99:00 - 100:00															

3. BILAGA 3 – FUNKTIONS ANALYS



4. BILAGA 4 – PRODUKTBLAD IRB-4600

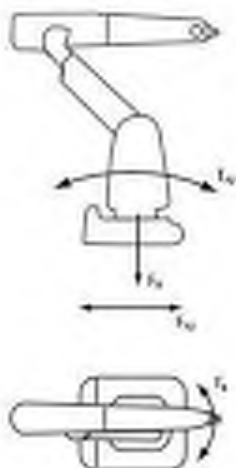
2 Installation and commissioning

2.2.1 Pre-installation procedure

Continued

Loads on foundation, robot

The illustration shows the directions of the robots stress forces.
The directions are valid for all floor mounted and suspended robots.



swt 100000271

F_{xy}	Force in any direction in the XY plane
F_z	Force in the Z plane
T_{xy}	Bending torque in any direction in the XY plane
T_z	Bending torque in the Z plane

The table shows the various forces and torques working on the robot during different kinds of operation.



Note

These forces and torques are extreme values that are rarely encountered during operation. The values also never reach their maximum at the same time!

Floor mounted

Force	Endurance load (in operation)	Max. load (emergency stop)
Force xy	±3040 N	±7700 N
Force z	4350 ±2460 N	4350 ±6360 N
Torque xy	±6650 Nm	±14090 Nm
Torque z	±1610 Nm	±2960 Nm

Suspended

Force	Endurance load (in operation)	Max. load (emergency stop)
Force xy	±3040N	±7700 N

Continues on next page

2 Installation and commissioning

2.2.1 Pre-installation procedure

Continued

Force	Endurance load (in operation)	Max. load (emergency stop)
Force z	-4350 ±2400N	-4350 ±6360 N
Torque xy	±6850 Nm	±14090 Nm
Torque z	±1510 Nm	±2960 Nm

Requirements, foundation

The table shows the requirements for the foundation where the weight of the installed robot is included:

Requirement	Value	Note
Maximum deviation from levelness	0.5 mm	Flat foundations give better repeatability of the resolver calibration compared to original settings on delivery from ABB. The value for levelness aims at the circumference of the anchoring points in the robot base. In order to compensate for an uneven surface, the robot can be recalibrated during installation. If resolver/encoder calibration is changed this will influence the absolute accuracy.
Maximum tilt	15°	The limit for the maximum payload on the robot is reduced if the robot is tilted from 0°. Contact ABB for further information about acceptable loads.
Minimum resonance frequency	22 Hz	

Storage conditions, robot

The table shows the allowed storage conditions for the robot:

Parameter	Value
Minimum ambient temperature	-25° C
Maximum ambient temperature	+55° C
Maximum ambient temperature (less than 24 hrs)	+70° C
Maximum ambient humidity	95% at constant temperature (gaseous only)

Operating conditions, robot

The table shows the allowed operating conditions for the robot:

Parameter	Value
Minimum ambient temperature	+5° C
Maximum ambient temperature	+45° C
Maximum ambient humidity	95% at constant temperature (gaseous only)

Continues on next page

5. BILAGA 5 - BERÄKNINGAR

Hållfasthetsberäkningar:

Följande bilaga går mer ingripande på hållfasthetsberäkningarna förkonstruktionens ramsystem. Beräkningarna har gjorts på de mesta kritiska delarna för koncepten. Till en början visas beräkningarna för koncept 1. De flesta lasterna kommer ifrån databladet som visas i bilaga 3. De dimensionerande kravet för hur mycket de får böjas är svårt att avgöra exakt. Det beror från fall till fall.

Ifrån att studera prototypen och de intervjuer som gjordes så ansågs den största dimensionerande faktorn vara att balkarna som var omkring 12 meter långa får inte inneha en deformerade böjning om 4 mm.

Många av hållfasthetsberäkningarna refererar till elementarfall. För att se elementarfallen se bilaga 8.

De nästkommande sidorna återfinns teckenförklaring samt några av de grundläggande formlerna som används för beräkningarna, därefter följer lastfallen.

Teckenförklaring:

σ = Spänning

E = E-modul

ρ = Densitet

g = gravitationskonstant

M = moment

F = kraft

I = Yttröghetsmoment

w = nedböjning

L = längd

A = Area

a = Acceleration

Grundläggande hållfasthets data:

Steiners sats (parallellförskutningssatsen)

Vid böjning runt en axel som ligger parallellt med den som går genom tyngdpunkten kan man beräkna motsvarande yttröghetsmomentet m.h.a. Steiners sats:

$$I_y = I_0 + a^2 \cdot A$$

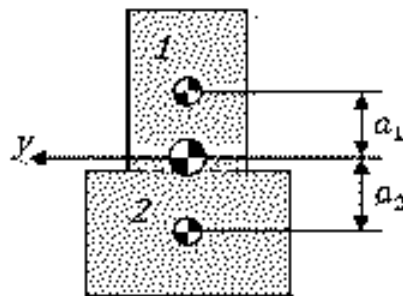
I_y är ytans yttröghetsmoment med avseende på den parallella axeln.

I_0 är ytans yttröghetsmoment med avseende på tyngdpunktsaxeln.

A är ytans area.

a är avståndet mellan ytans tyngdpunktsaxel och den parallella axeln.

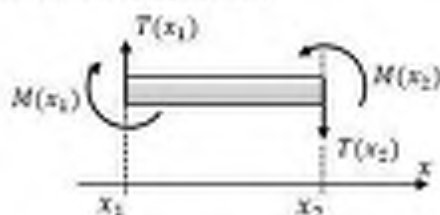
Exempel på tillämpning av Steiner's sats: Yttröghetsmomentet för ett sammansatt tvärsnitt.



$$I_y = I_{y,1} + I_{y,2} = I_{0,1} + A_1 \cdot a_1^2 + I_{0,2} + A_2 \cdot a_2^2$$

4.3 Balkar (böjning)

Vanliga riktningar för snittkraften $T(x)$ och snittmoment $M(x)$ i balkar.



$$T(x) = M'(x)$$

$$q(x) = -T'(x) = -M''(x)$$

Största normalspänning från böjande moment.

$$|\sigma|_{\max} = \frac{|M|}{W_b}$$

$|\sigma|_{\max}$ är absolutbeloppet av den största drag eller tryckspänningen.

W_b är böjmotståndet.

Böjmotståndet W_b (för böjning runt y-axeln) är:

$$W_b = \frac{I}{|z|_{\max}}$$

I är balktvärsnittets yttröghetsmoment

OBS: Vid böjning runt z-axeln ersätts $|z|_{\max}$ av $|y|_{\max}$

$|z|_{\max}$ är absolutbeloppet av z-kordinaten för den delen av tvärsnittet som är mest avlägsen från böjningsaxeln.

Normalspänningen på en given plats i en balk som är parallell med x-axeln och böjs runt y-axeln kan beräknas enligt:

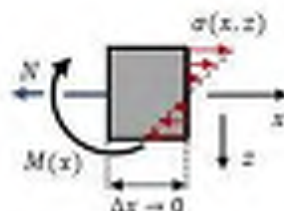
$$\sigma(x, z) = \frac{N}{A} + \frac{M(x) \cdot z}{I(x)}$$

N är summan av eventuella axell krafter.

A är tvärsnittets area.

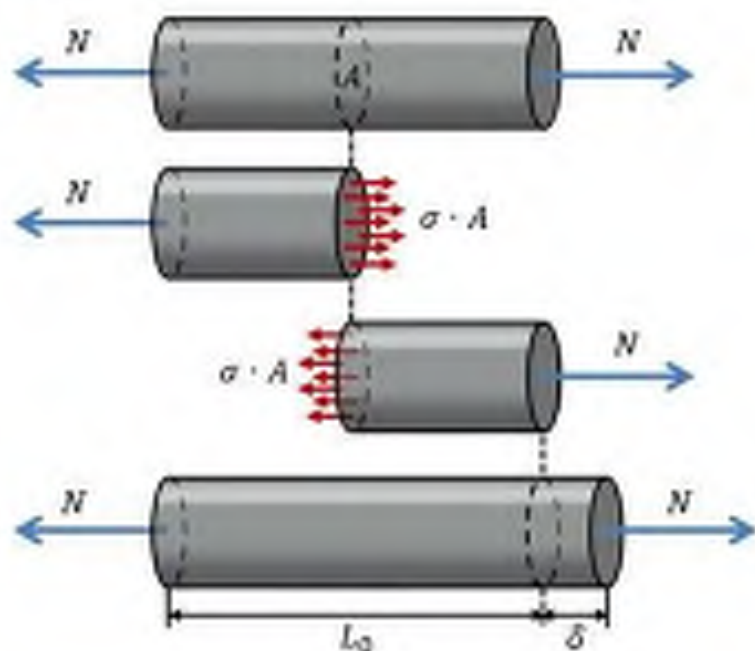
$M(x)$ och $I(x)$ är tvärsnittsmoment och yttröghetsmoment för den givna x-kordinaten.

z är z-kordinaten, med positiv riktning nedåt och $z = 0$ beläget vid tvärsnittets tyngdpunkt.



2 Materialsamband och materialdata

2.1 Normalspänning



Normalspänningen ges av sambandet:

$$\sigma = \frac{N}{A}$$

σ är normalspänningen
 N är normalkraften
 A är snittytares area

Normalförlängningen ges vid små deformationer av sambandet

$$\epsilon = \frac{\delta}{L_0} \quad (\delta \ll L_0)$$

och vid stora deformationer av:

$$\epsilon = \ln\left(1 + \frac{\delta}{L_0}\right) = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right)$$

ϵ är normalförlängningen
 δ är (positiv) längdförändring
 L_0 är den ursprungliga längden

Hooke's lag (gäller för linjärt elastiska material):

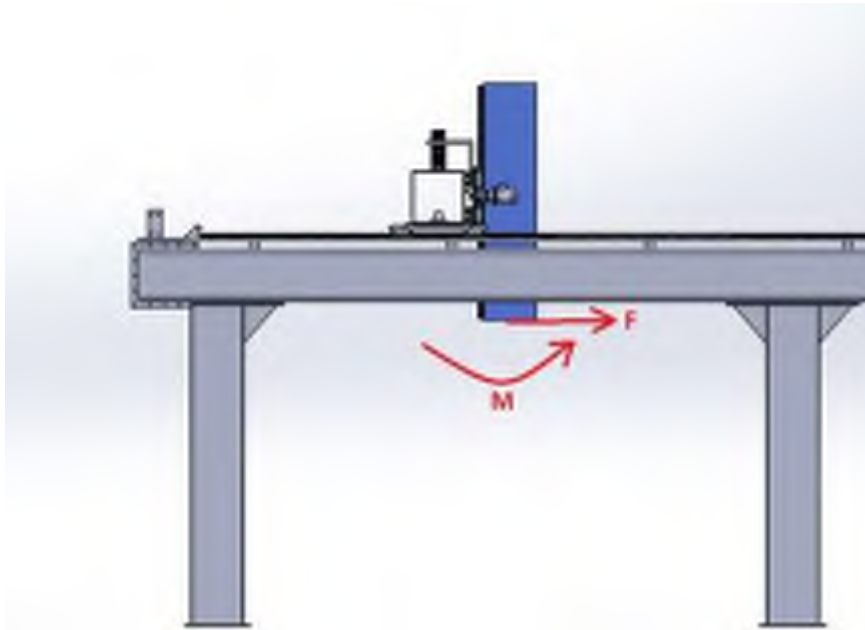
$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \alpha T$$

α är materialets
temperaturutvidgningskoefficient
 T är temperaturförändringen
 E är materialets E-modul.

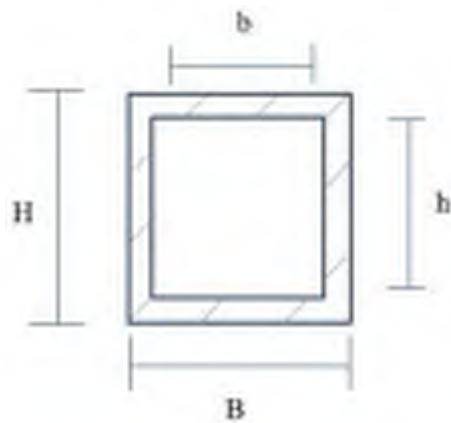
Lastfall 1: Böjning av stickan.

Det första lastfallet som behandlades var dimensionen för stickan som kontrollera Z-axeln. Detta lastfall berör både koncept 1 och 2. Lastfallet studerar vad som händer om maxmoment för roboten ges och om systemet gör en tvärbromsning.

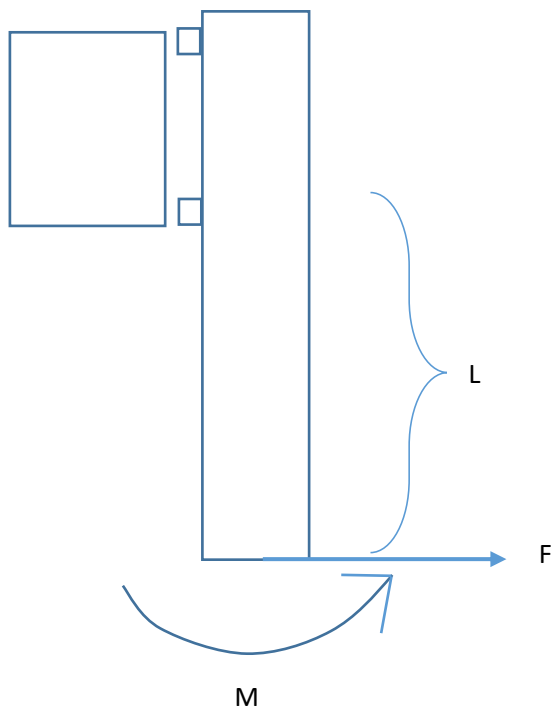
Lastfallet:



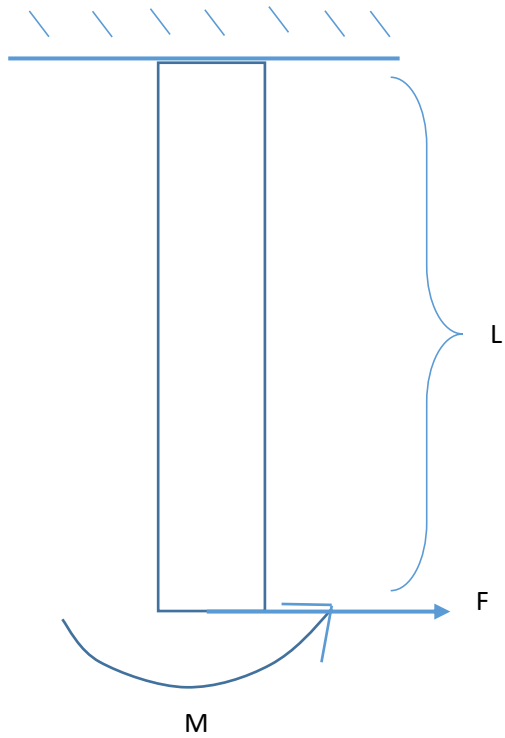
Tvärsnitt på Stickan:



Lastfallet uppställt:



Förenkling av lastfallet för att likna elementarfallen:



Ingångsvärden:

$$a = 0,47619047767 \text{ m/s}^2$$

$$M = 14090 \text{ Nm}$$

$$L = 6000 \text{ mm}$$

$$B = 550 \text{ mm}$$

$$H = 550 \text{ mm}$$

$$b = 540 \text{ mm}$$

$$h = 540 \text{ mm}$$

$$E = 206 \text{ GPa}$$

$$m = 435 \text{ kg}$$

Max momentet M och tyngden m är hämtade från databladet för IRB-4600. Accelerationen a är hämtad från beräknat data då maxbromsmoment är beräknat i bilaga 5.

Detta är ett dynamiskt lastfall där den begränsande faktorn är hur mycket stickan får böja sig. Det som sätter kravet är styrningarna i Z-led. Med det dimensionerande kravet där linjär styrningarna inte får röra sig mer än 1,389 mm på 4 meter och stickan beräknas för 6 meter gör det att stickan inte får böjas mer än 2,0835 mm.

Beräkning av kraften F :

Detta är ett dynamiskt lastfall. Till en början beräknas således kraften F ut. Denna kraft är den kraften som uppstår av robotens tyngd vid maximal inbromsning. Kraften räknas ut via formeln för Newtons andra lag:

$$F = ma$$

Detta ger:

$$F = 435 * 0,47619047767 \rightarrow F = 207,1428578 \text{ N}$$

Yttröghetsmoment:

För att beräkning styvhet beräknas yttröghetsmomentet på stickan, i fall då den geometriska formen på tvärsnittet är har ett fördefinierat yttröghetsmoment eller metod för att räkna ut det går det att använda sig av Steinerssats för att beräkna yttröghetsmomentet. Dock behövs inte det inte använda den beräkningsmodellen då tvärsnittet är symmetrisk i båda riktningar, både i höjden och på bredden. Därmed går det att räkna ut yttröghetsmomentet på följande sätt:

$$I = \frac{BH^3}{12} - \frac{bh^3}{12}$$

Detta ger följande:

$$I = \frac{550 * 550^3}{12} - \frac{540 * 540^3}{12}$$

Resulterar i:

$$I = 105012000 \text{ mm}^4$$

Beräkna av böjning:

Utböjningen beräknades för stickan beräknades genom att använda sig a elementarfall som tar hänsyn till maxmomentet och kraften F separat för att sedan slå ihop dem

Beräkning för maxmomentet, använder sig av elementarfall 5:

Elementarfall 5 ger följande formel:

$$W(L) = \frac{ML^2}{2EI}$$

Ger följande:

$$W(L) = \frac{14090 * 6000^2}{2 * 206 * 10^3 * 105012000}$$

Resulterar i:

$$W(L) = 0,00117240415 \text{ mm}$$

Böjning med avseende på kraften F använder sig av elementarfall 1:

Elementarfall 1 ger följande formel:

$$W(L) = \frac{FL^3}{3EI}$$

Ger följande:

$$W(L) = \frac{207,1428578 * 6000^3}{3 * 206 * 10^3 * 105012000}$$

Resulterar i:

$$W(L) = 0,6894397349 \text{ mm}$$

Totalutböjning ger:

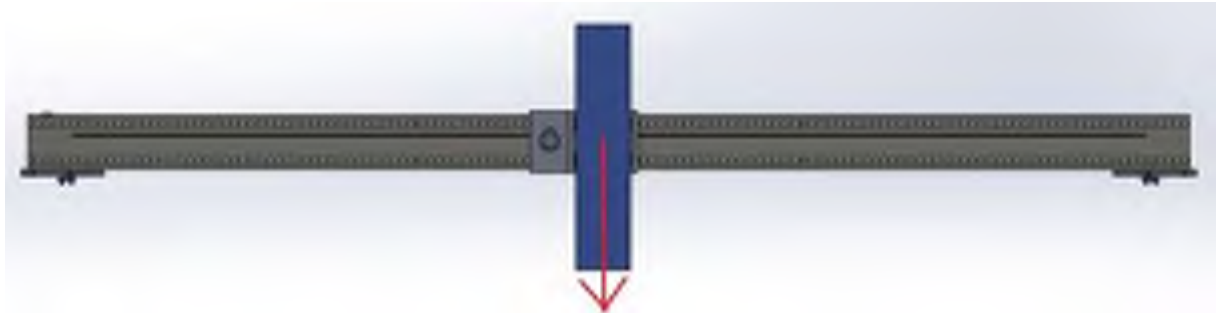
$$TotW(L) = 0,6894397349 + 0,00117240415$$

$$TotW(L) = 0,6906121391 \text{ mm}$$

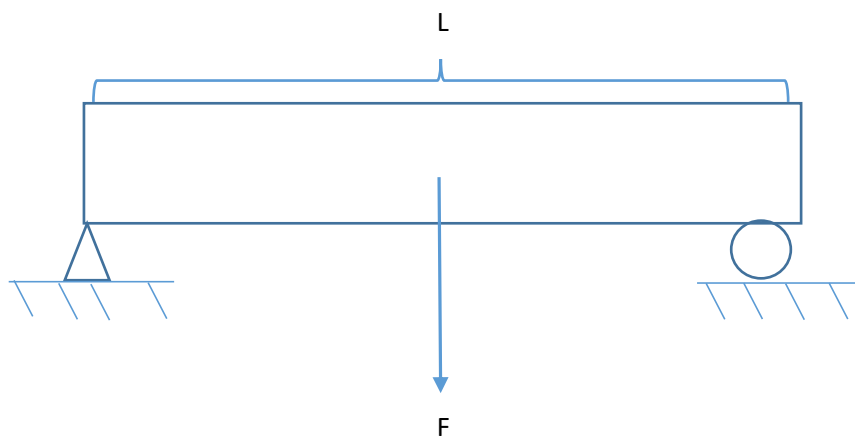
Således är det en väldigt liten böjning på stickan:

Lastfall 2:

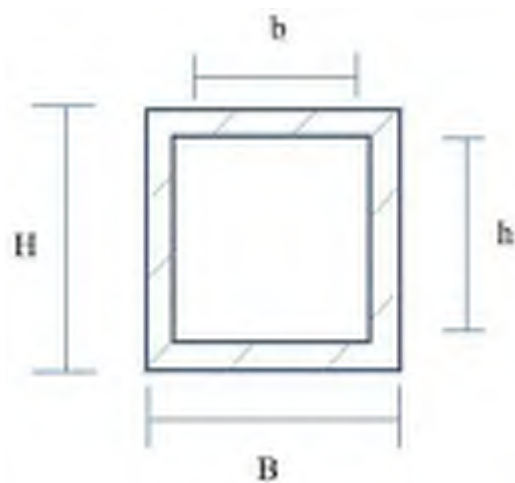
Detta lastfall är böjningen av robotbalken. Se bilden nedan, detta lastfall är för både koncept 1 och 2.:



Lastfallet förenklat:



Tvärsnitt:



Indata:

$$F = 54485 \text{ N}$$

$$L = 12000 \text{ mm}$$

$$B = 500 \text{ mm}$$

$$b = 480 \text{ mm}$$

$$H = 560 \text{ mm}$$

$$h = 500 \text{ mm}$$

$$E = 206 \text{ GPa}$$

Kraften F är den sammanlagda vikten av stickan egenvikten plus vikten av roboten.

Dimensionerande krav:

I och med att även var linjärstyrningar som befann sig på denna balk ansågs det att samma dimensionerande krav som föregående lastfall var det som skulle dimensioneras efter. I och med detta beräknades således maxutböjning för x-axeln. Det beräknade värdet för en 12 meter lång balk blir då 4,167 mm nedböjning på balken för x-axeln. s

Yttröghetsmoment uträkning:

Likt föregående lastfall beräknades först yttröghetsmomentet. Samma geometri för tvärsnittsarea ger samma uträkning:

$$I = \frac{500 * 560^3}{12} - \frac{480 * 520^3}{12}$$

Resulterar:

$$I = 1693013333 \text{ mm}^4$$

Beräkna av utböjning:

För uträkning av nedböjning används elementarfall 6:

Elementarfall 6 ger formeln:

$$W(x) = \frac{FL^3}{6EI} \beta((1 - \beta^2) \frac{x}{L} - \frac{x^3}{L^3})$$

Ger följande uträkning:

$$W(x) = \frac{54485 * 12000^3}{6 * 206 * 10^3 * 1693013333} * 0,5((1 - 0,5^2) \frac{6000}{12000} - \frac{6000^3}{12000^3})$$

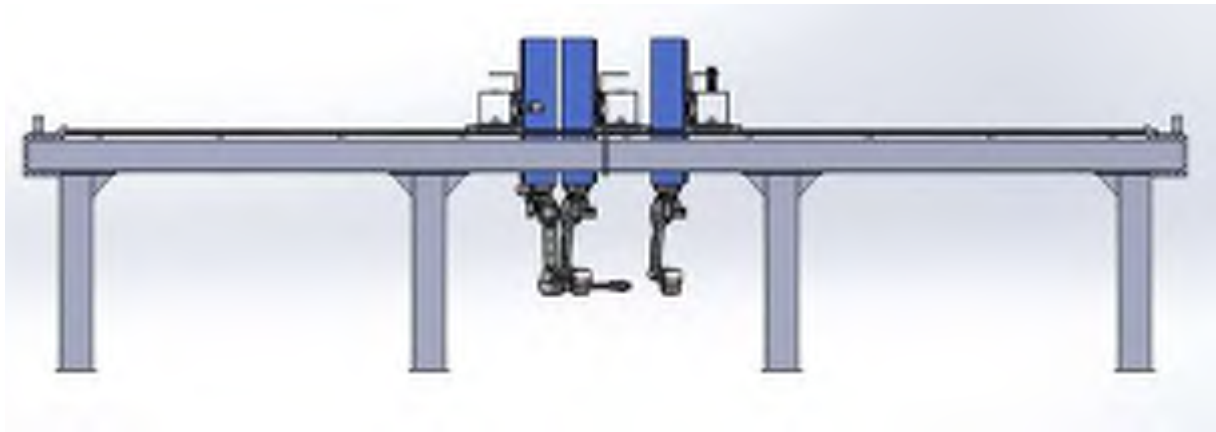
Resulterar i:

$$W(x) = 4,10890052 \text{ mm}$$

Detta är alltså precis på gränsen för nedböjning neråt men ändå godtyckligt:

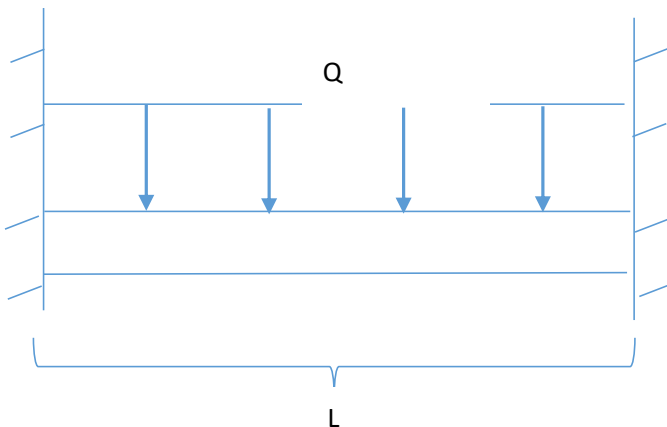
Lastfall 3: Nedböjning av hörnbalk.

Detta lastfall är för att se hur stora balkarna på hörnet bör vara. Detta lastfall är enbart för koncept 1.

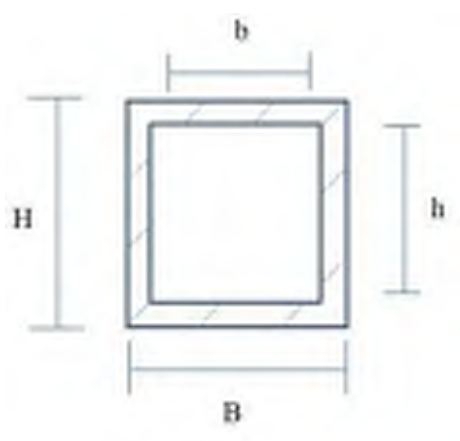


Hörnbalkarna ansågs att vara i mest kritisk läge när samtliga balkar var koncentrerade likt bilden ovan. Lastfallet liknades med att det blev en jämt utbredd last mellan pelarna i och med att när balkarna var samlade såsom på bilden tog den i princip upp hela sträckan mellan pelare.

Lastfallet förenklat:



Tvärsnitt:



Grunddata:

$$Q = 163455,7143 \text{ N}$$

$$L = 10000 \text{ mm}$$

$$H = 400 \text{ mm}$$

$$B = 400 \text{ mm}$$

$$H = 360 \text{ mm}$$

$$B = 360 \text{ mm}$$

$$E = 206 \text{ GPa}$$

Lasten Q är den sammanlagda vikten av alla tre balkar inklusive stickorna och roboten.

Yttröghetsmoment.

Med samma tvärsnitt ger likadan uträkning:

$$I = \frac{400 * 400^3}{12} - \frac{360 * 360^3}{12}$$

Resulterar i:

$$I = 733653333 \text{ mm}^4$$

Beräkning av nedböjning:

Superponera elementar fall 7 och 10:

Elementarfall 7 ger nedböjning

$$W\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{5QL^3}{384EI}$$

Elementarfall 10 ger nedböjning

$$W\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{L^2}{6EI} \left(Ma \left(\frac{1}{8} - \frac{3}{4} + 1 \right) + Mb \left(-\frac{1}{8} + \frac{1}{2} \right) \right)$$

$$Ma = Mb = M$$

Förenklat:

$$W\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{L^2}{6EI} * \frac{3M}{4} \rightarrow W\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{1}{8} * \frac{ML^2}{EI}$$

Elementarfall 17 ger:

$$M = \frac{QL}{12}$$

Detta är enbart för att få ett värde för M.

Vid supponering av fallen så ges det en böjning uppåt och en böjning neråt. Det som ska beräknas är nedböjningen neråt:

Böjning uppåt:

$$w\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{1}{8} * \frac{\frac{QL}{12} * L^2}{EI}$$

Böjning neråt:

$$w\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{5QL^3}{384EI}$$

Total nedböjning:

$$w\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{5QL^3}{384EI} - \frac{4QL^3}{384EI} \rightarrow w\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{QL^3}{384EI}$$

Stoppa in värden i formeln ger:

$$w\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{163455,7143 * 10000^3}{384 * 206 * 10^3 * 395720000}$$

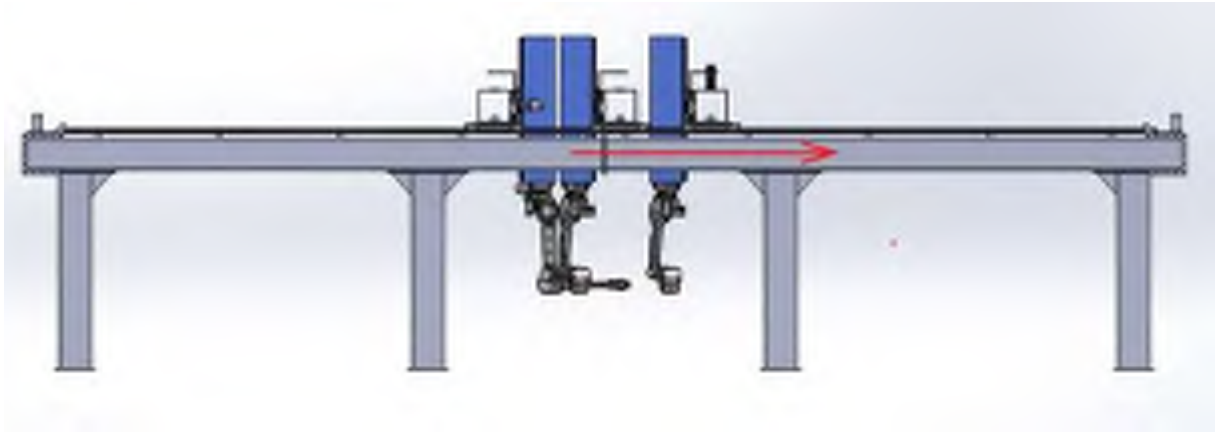
Resulterar i:

$$w\left(\frac{L}{2}\right) = 2,816506567 \text{ mm}$$

I och med att detta lastfall också även bygger på att styrningarna är dimensionerande ger det att balken max får böjas 3,465 mm så anses denna nedböjning godtycklig.

Lastfall 4 – Nödbroms av alla tre balkar:

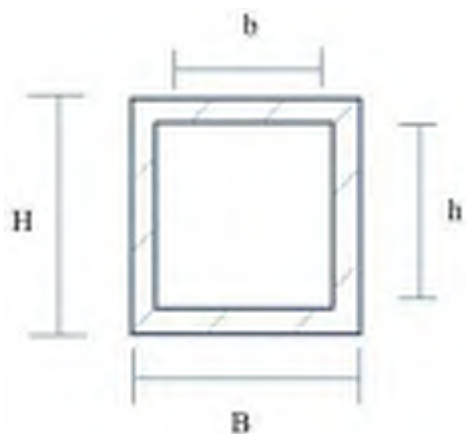
Lastfall 4 analyserar vad som händer om alla tre balkar rör på sig och nödbromsar. Detta är en dynamisk beräkning som bara berör koncept 1, se bild nedan:



De kritiska för de här lastfallet är pelarna som bär upp hela robotsystemet. Under utvecklingsprocessen bestämdes det tillslut att vara 10 stycken pelare som bär upp konstruktionen om det använder sig av koncept 1, detta var mest för praktiska själ då det passade bäst med ihopfogningarna. Det betyder 5 stycken pelare på vardera sida, vilket inte är fallet på bilden då det enbart är 4 stycken pelare på vardera sida. Kravet för vad som är dimensionerande var svårt för detta lastfall. Önskemålet är att det ska vara väldigt robust när det förflyttar sig. I och med att pelarna ska linjera med balkarna testades det att beräknas på en dimension som passade bra med de bärande balkarna och en standard gods tjocklek på 20 mm.

Tvärsnitt:

Det resulterade i detta tvärsnitt:



Indata:

$$H = 500$$

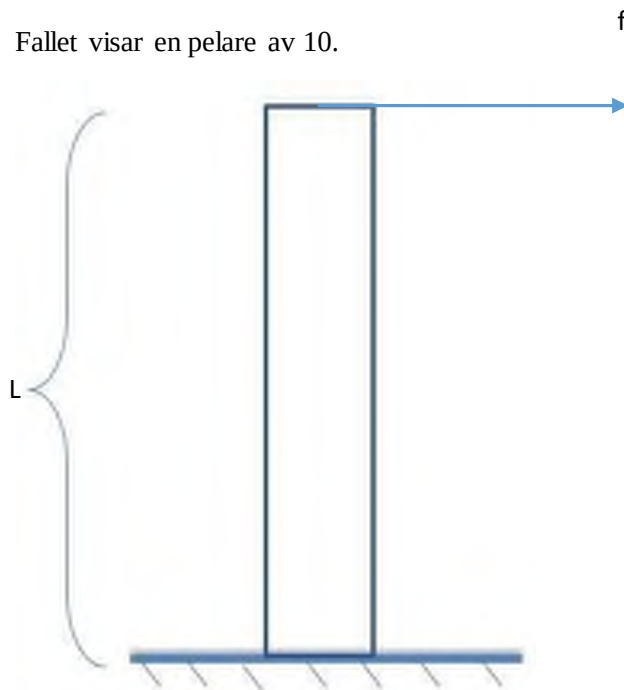
$$B = 500$$

$$h = 480, b = 480$$

$$L = 5420 \text{ mm}$$

Förenkling av fallet:

Fallet visar en pelare av 10.

**Beräkning av yttröghetsmoment:**

Samma geometri för tvärsnittsarea som tidigare ger samma uträkning:

$$I = \frac{500 * 500^3}{12} - \frac{480 * 480^3}{12}$$

Resulterar:

$$I = 784653333,3 \text{ mm}^4$$

Beräkning av bromskraft:

Vid beräkning för bromskraften f togs data från produktbladet av ABB:s Drivenheter. Den slutgiltiga motorn som valdes var motorenheten MU400 som är ABB:s största motorenhet till robotsystemet.

Max bromsmoment för ABB:s motor MU400: 60 Nm

Slutgiltigt val för storlek p drivande valdes till att bli 40 mm i radie.

Beräkning av bromskraften ges av formeln

$$M = Fr$$

I detta fall är M momentet, F är kraften och r är avståndet från momentpunkten till kraftens utväxling, det vill säga radien på kuggen då momentpunkten är i centrum av kuggen och kraftutväxlingen är i kugg ingreppet. Formeln ger följande värden:

$$\frac{60}{0,04} = F$$

$$F = 1500 \text{ N}$$

6 stycken ställen som bromsas samtidigt:

$$F * 6 = 9000 \text{ N}$$

I och med att det är drivning på 2 ställen per balk och det är 3 balkar så betyder det att det är 6 stycken ställen som bromsas samtidigt.

Detta ger en total bromskraft på 9000 N.

Förutsatt att det är 10 pelare som tar upp kraften lika.

Ger:

$$f = \frac{F}{10}$$

$$f = 900 \text{ N}$$

Kraften f går nu att använda sig av i ett elementarfall. Elementarfallet som används är nummer 1. Detta ger:

$$W(L) = \frac{fL^3}{3EI}$$

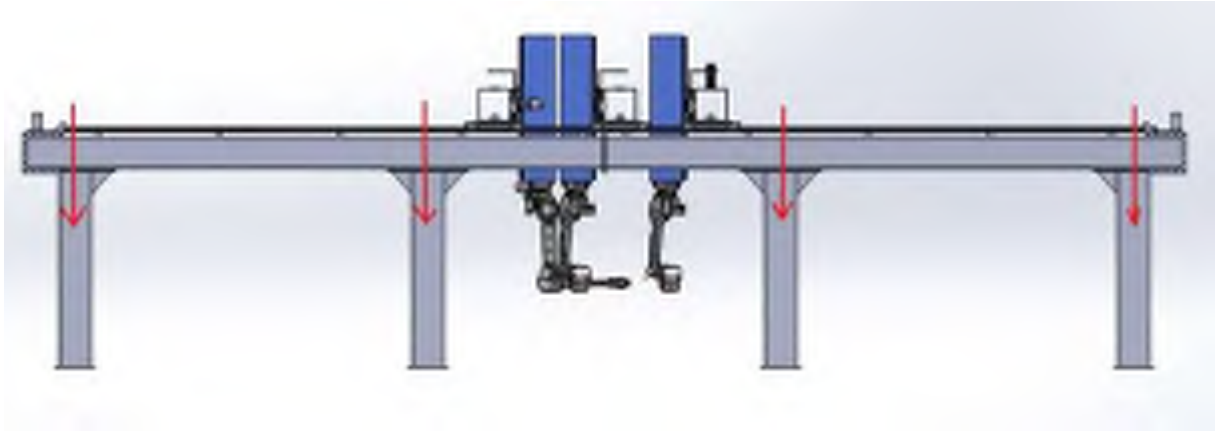
$$W(L) = \frac{900 * 5420^3}{3 * 206 * 10^3 * 784653333,3}$$

$$W(L) = 0,5245909572 \text{ mm}$$

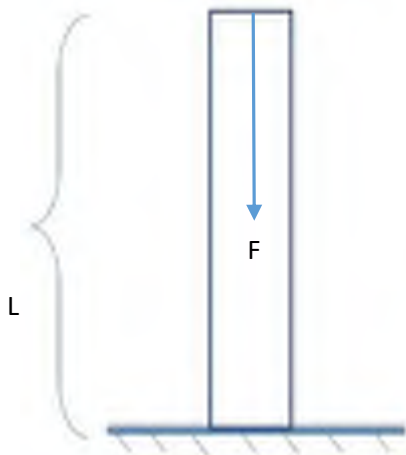
Detta är en väldigt lite böjning av pelarna id maxinbromsning. Detta ansågs godtyckligt och dimensionen som valdes för att anpassa sig mot de bärande balkarna fungerade således bra.

Lastfall 5 – Ihoptryckning av pelare:

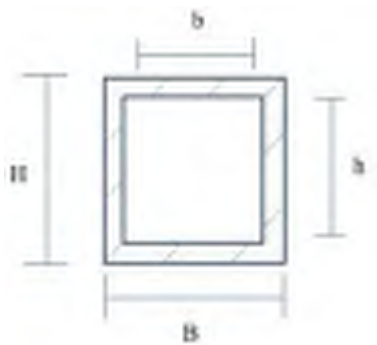
Detta lastfall är till för att studera hur mycket pelarna trycks ihop. Detta lastfall är enbart beräknat för koncept 1. Samma modell går att använda för koncept men med andra ingångsvärden. Denna modell för koncept 2 gjorde aldrig då det sågs att efter denna beräkning att det inte skulle vara ett särskilt kritiskt lastfall och att oavsett vilket koncept som skulle väljas skulle det vara hyfsat enkelt att kunna dimensionera pelarna efter det här lastfallet. Se bild nedan för lastfall:



Förenklad bild av lastfallet för Ihoptryckning av pelare:



Tvärsnitt:



Grunddata:

$$F = 73353,82 \text{ N}$$

$$E = 206 \text{ GPa}$$

$$L = 5420 \text{ mm}$$

$$H = 500$$

$$B = 500$$

$$h = 480$$

$$b = 480$$

I detta fall är F den sammanlagda vikten av alla balkar, robotar, stickan för Z-led och hörnbalkar.

Beräkna Yttröghetsmoment:

$$A = 500^2 - 480^2 \rightarrow A = 19600 \text{ mm}^2$$

Beräkning av spänning:

Detta ger påfrestningen på balken

$$\sigma = \frac{F}{A} \rightarrow \frac{73353,82}{19600} \rightarrow \sigma = 3,74 \text{ MPa}$$

Hookeslag:

Hookes lag i detta fall ger deformationen:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

$$\varepsilon = \frac{3,74}{206 * 10^3} \rightarrow \varepsilon = 1,8 * 10^{-5}$$

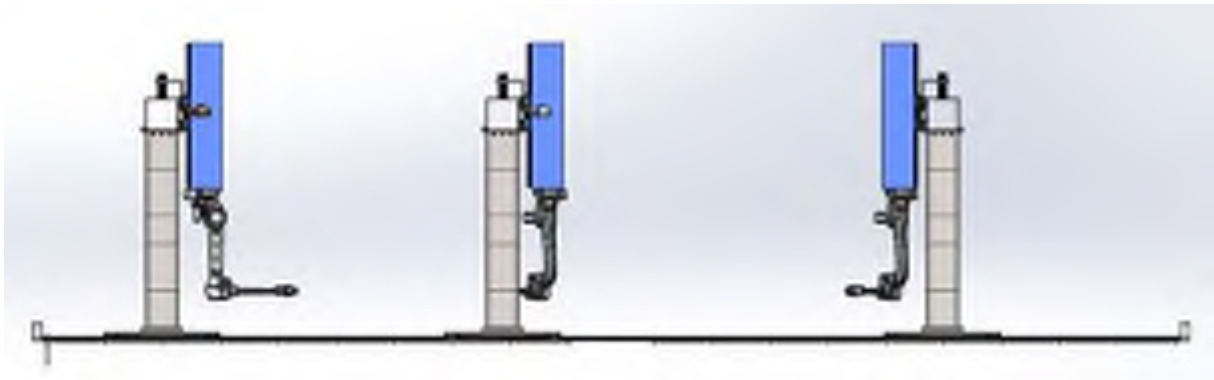
Resulterar att deformationen deformationen när pelarna trycks ihop är:

$$\delta = \frac{\varepsilon}{L} \rightarrow \delta = \frac{1,8 * 10^{-5}}{5420} \rightarrow \delta = 3,35 * 10^{-9} \text{ mm}$$

Som detta beräknings exempel visar så trycks konstruktionen ihop väldigt lite och ansågs då som ej kritiskt. Där med gjorde ingen beräkning för detta lastfall för konstruktion 2. Om det i ett senare skedde hade varit så att koncept 2 hade varit det konceptet som blivit slutgiltigt hade en beräkning av detta lastfall ändå gjorts för koncept 2.

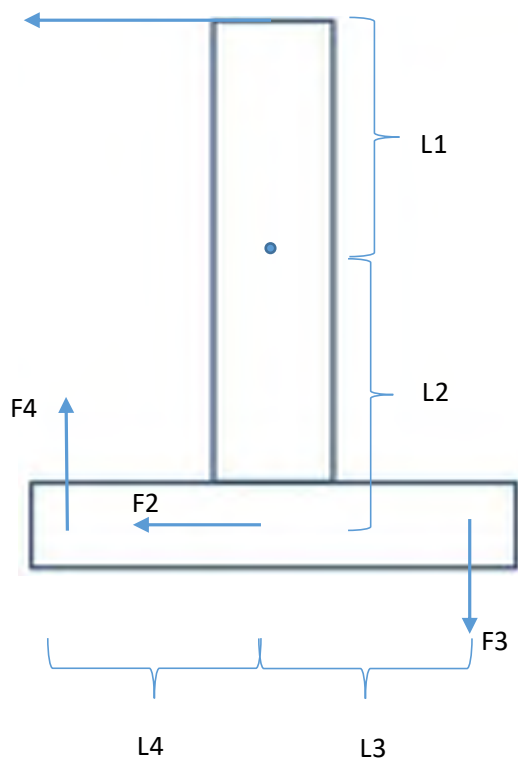
Lastfall 6 – Nödbroms koncept 2.

Detta lastfall ansågs som det mest kritiska för koncept 2. Detta är ett dynamiskt lastfall som bara gäller för koncept 2. Lastfallet beskriver vad som händer då en av portalerna nödbromsar, se bild nedan:



Förenklad bild för lastfall 6.

F1



Detta är ett speciellt lastfall med många variabler som går att ändra på. Exempelvis går det att experimentera mycket med längden $L4$ och $L3$ för att ändra krafterna $F3$ och $F4$. Målet med att studera detta lastfall är just att ta reda på krafterna $F3$ och $F4$ för att se om det finns några styrksenor som klarar de krafterna.

Grunddata:

$L1 = L2 = 2710 \text{ mm}$ – Avståndet till momentpunkten som balken vill rotera runt vid inbromsning i Z-led

$L3 = L4 = 1500 \text{ mm}$ - Avståndet till momentpunkten som balken vill rotera runt vid inbromsning i x-led

$M1 = 4200 \text{ kg}$ - Vikten av robotbalken, stickan och roboten.

$M2 = 4200 / 2 = 2100 \text{ kg}$ -

Bromskraft att utgå ifrån är 60 Nm , detta är återigen samma data som är hämtad för motorn MU400.

Likt lastfall 4, beräknas bromskraften på samma sätt.

$$M = Fr$$

$$\frac{60}{0,04} = F$$

$$F = 1500 \text{ N}$$

Det blir samma värde då samma kugg på 40 mm är beräknat.

Dock är det bara två hjul om behövs tas hänsyn till denna gång:

$$F * 2 = 3000 \text{ N}$$

Accelerationen för hela inbromsningen beräknas via:

$$F = M * a$$

Då F är känd och M i detta fall som är totala vikten för hela konstruktionen går det att beräkna ut a .

$M = 6300 \text{ kg}$ ($M1 + M2$)

Detta ger:

$$3000 = 6300a$$

Som resulterar i:

$$a = 0,47619047767 \text{ m/s}^2$$

Genom att använda sig av accelerationen a som alla krafter delar går det att beräkna de individuella krafterna:

$$F1 = 4200 * 0,47619047767 \rightarrow F1 = 2000 \text{ N}$$

Detta är kraften av robotbalken när den inbromsar.

$$F2 = 2100 * 0,47619047767 \rightarrow F2 = 1000 \text{ N}$$

Detta är kraften som kommer ifrån massan som är under momentpunkten för balken.

Beräkning för hur balken kommer rotera runt momentpunkten:

$$M = F1 * L1 - F2 * L2 - 2 * F3 * L3$$

Sätt värdet till momentet till 0, på detta sätt beräknas det hur det ser ut innan pelaren roterar. Detta innebär att pelaren inte kommer att välta med andra ord.

$$M = 0 \text{ Nm}$$

Med inget moment går det att få ut F_3 .

$$F_3 = \frac{F_1 * L_1 - F_2 * L_2}{2 * L_3}$$

$$F_3 = \frac{2000 * 2710 - 1000 * 2710}{2 * 1500}$$

$$F_3 = 903 \text{ N}$$

Detta betyder att om detta koncept väljs måste en styrning klara 903 Newton om avståndet för bottenplattan är 3000 mm.

Lastfall 7 – Detta lastfall är för att undersöka om standardbalkar är ett alternativ att gå efter istället för att tillverka egna.

Lastfallet har enbart kopierat samma lastfall som lastfall 2, alltså nedböjning av robotbalken. I och med att det är samma lastfall så beräknas det på samma sätt fast med utbytta värden:

Ny indata:

Yttreghetsmoment: $271 * 10^6 \text{ mm}^4$

Vikt per meter: 235 kg/m

Indatat är hämtat ifrån begroups hemsida för standardprofiler. Det som används är den absolut kraftigaste och starkaste fyrkantsprofilen som går att beställa.

Beräkning:

Denna nya indata används i formeln för nedböjning av lastfall 2.

Detta ger värdena:

$$W(x) = \frac{44076,43571 * 12000^3}{6 * 206 * 10^3 * 271 * 10^6} * 0,5((1 - 0,5^2) \frac{6000}{12000} - \frac{6000^3}{12000^3})$$

Resulterar i:

$$W(x) = 7,804131799 \text{ mm}$$

Ned böjningen är nästan på 8 mm med den kraftigaste fyrkantsprofilen som går att beställa. Vilket resulterar i att en standard balk inte går att använda då kravet för deformation är 4 mm.

6. BILAGA 6 - BERÄKNING AV VÄXELLÅDA

Indata:

$N_{rms} = 1880 \text{ rpm}$ - Varvtal från motorn

$T_{rms} = 20 \text{ Nm}$ – Vridmoment från motorn

$D = 120 \text{ mm}$ – Diametern på kuggen

$V = 0,5 \text{ m/s}$

Beräkning

Beräkning av valet för växellåda har skett i korrelation med valet för kugghjul som driver. Indatat är hämtat från ABB:s hemsida för deras motorenheter samt från Atlantas hemsida för kuggstång. Hastighet som är satt till $0,5 \text{ m/s}$ är en omdiskuterad lämplig hastighet att förflytta stängerna på.

Det slutgiltiga valet för storlek på kugg blev en kugg som hade en diameter om 120 mm . För att ta reda på utväxlingen på växellådan beräknades först varvtalet på kugghjulet som driver. Formeln för att ta reda på hastighet och varvtalet för en roterande kugg är följande:

$$V = \frac{2\pi r \cdot \omega}{60}$$

Då hastigheten är given och det är varvtalet som söks sorteras formeln om och givna värden stoppas in. Detta ger följande:

$$\frac{60 \cdot 0,5}{2\pi \cdot 0,060} = \omega$$

Detta ger varvtalet:

$$\omega = 80 \text{ varv/min}$$

Det utgående varvtalet för motorn är 1800 varv/min . Detta blir det ingående varvtalet på växellådan. Varvtalet som den drivande kuggen ska köra är således det utgående varvtalet för växeln.

Beräkning för utväxling blir då följande:

$$Z = \frac{\omega(\text{in})}{\omega(\text{ut})}$$

Ger:

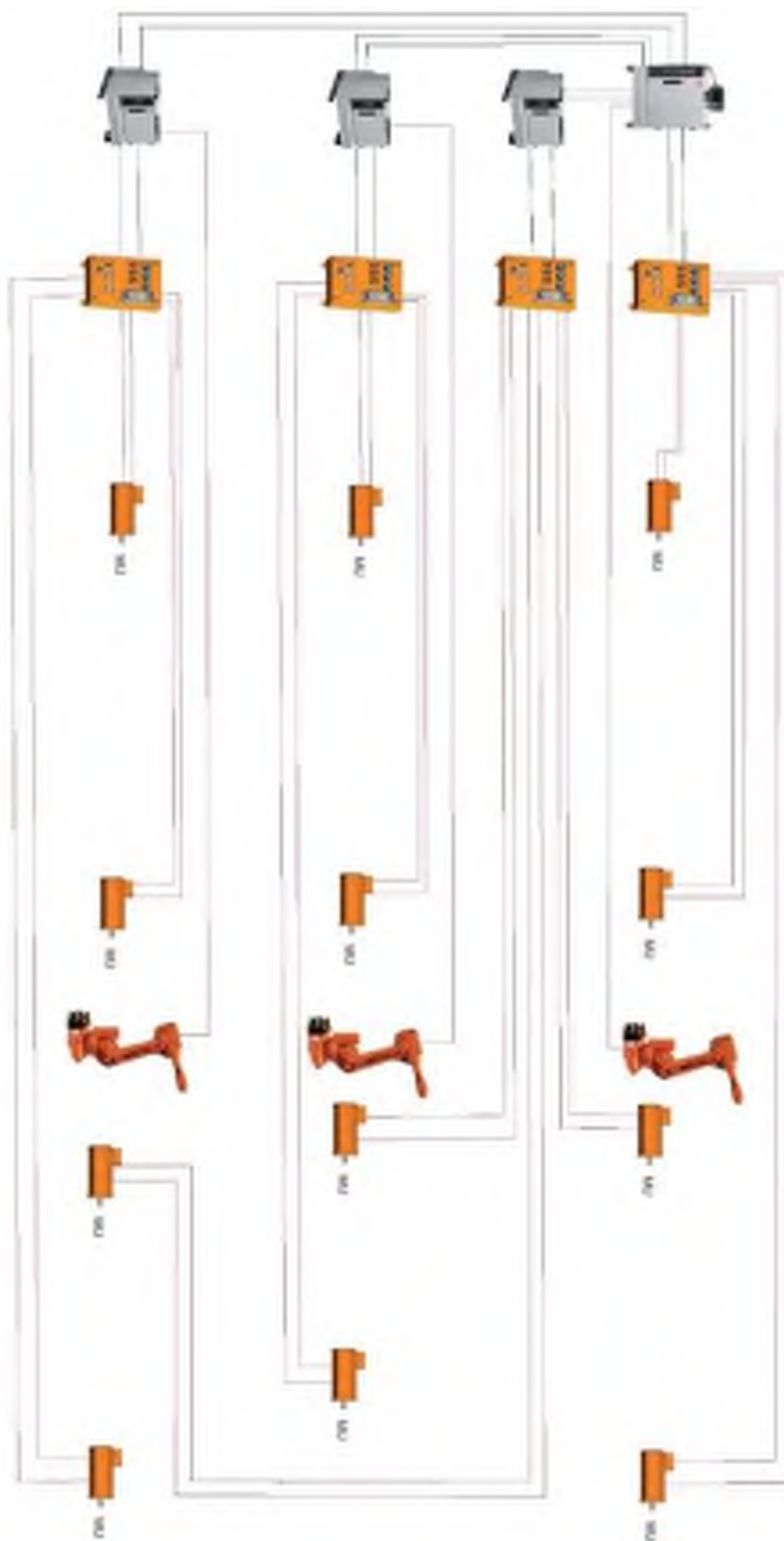
$$Z = \frac{1800}{80}$$

Resultatet:

$$Z = 22,5$$

Således väljs alltså en växel med minsta utväxlingen $22,5$. I dialog med Atlantis så fungerar en snäckväxel med storlek 100 med motorn MU400. Med en minsta utväxling på $22,5$ väljs snäckväxeln 56 06 029 som har en utväxling om 29.

7. BILAGA 7 – FÖRSTORAD BILD AV KABELDRAGNING



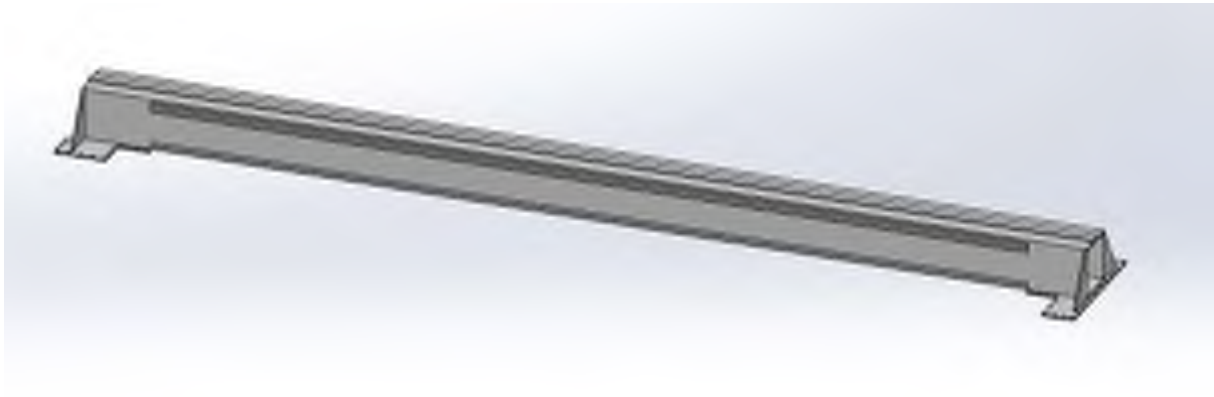
8. BILAGA 8 – FEM-ANALYSER

Som stöd till hållfasthets beräkningar gjordes även FEM-Analyser. Dessa analyser var till för att verifiera om tankesättet med lastfallen var rätt och om de hade närliggande värde som hållfasthetsberäkningarna.

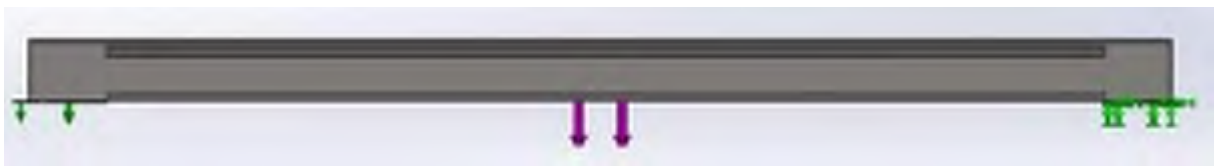
Därmed ställdes lastfallen upp i en FEM-miljö. Programvaran som användes var solidworks.

Lastfall 2:

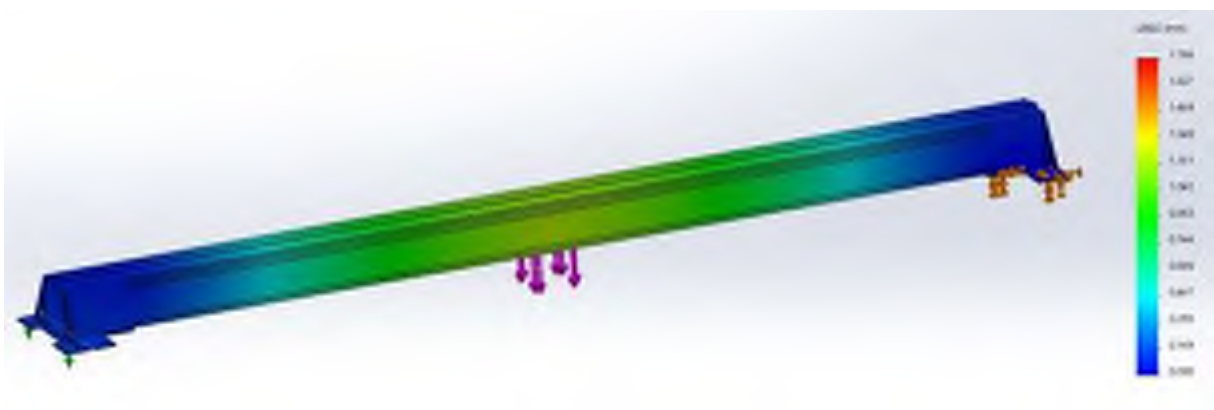
Ett av de enklare lastfallen att beräkna i en FEM miljö.



Det som skulle beräknas är robotbalken, se figuren ovan, och försöka ställa upp samma lastfall som i lastfall 2:



Randvilkoren som ställdes upp i solidworks är att balken är helt fast inspänd på ena sidan men flytande på den andra. I mitten är last om 54485 N rakt neråt. Denna uppställning är exakt likadan som lastfallet som har beräknats.



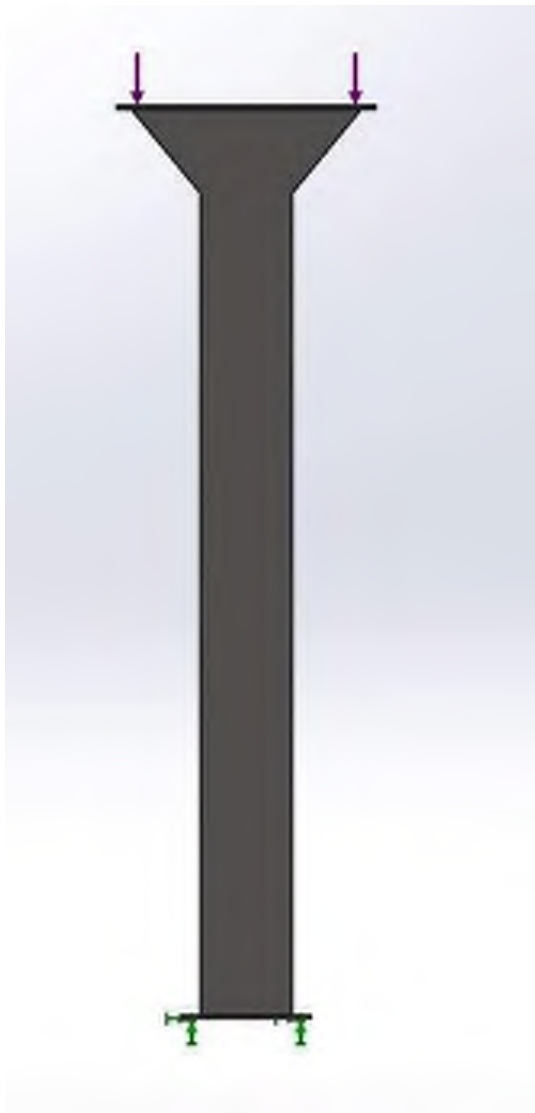
Resultatet av FEM-Analysen visar att den största deformationen sker på mitten och är omkring 1,8 mm stor. Detta ger en feldifferens mellan det framräknade värdet på 4,1 mm till 2,3 mm.

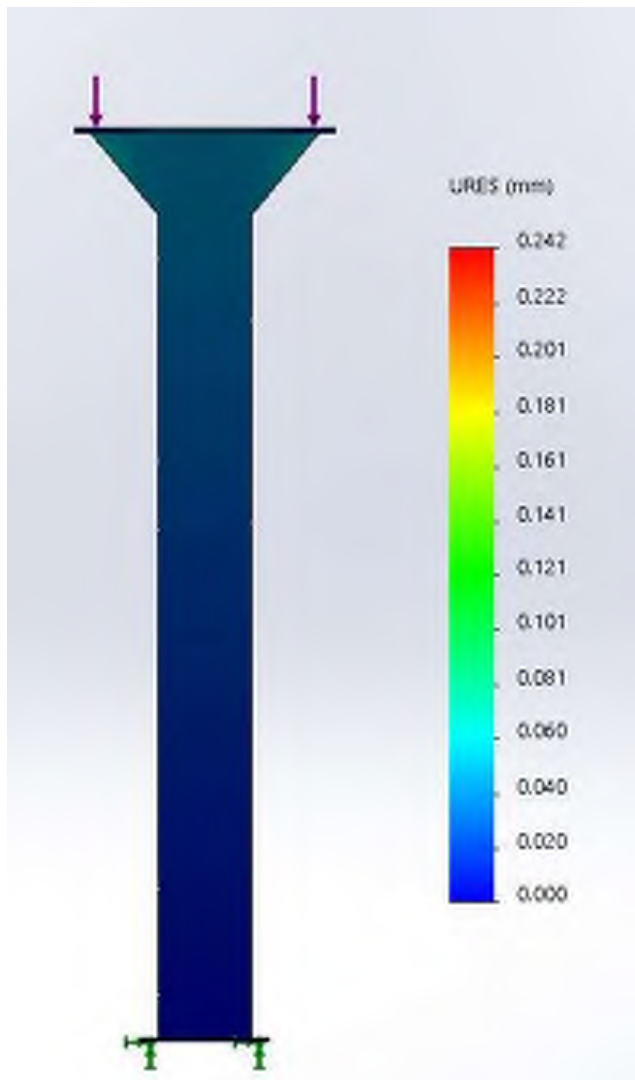
Det är inte så konstigt att värdena skiljer sig en aning åt. Det kan bero på att balken som testas i FEM-Analysen har lite flera förstärkande egenskaper såsom utformningen på sidorna. Även inspänningen av balken skiljer sig genom att det tar upp en större ytan istället för att bara sitta fast i 2 imaginära punkter som den gör i hållfasthetsberäkningarna.

Det viktiga att ta med sig är att ha ett extra komplement att tidigare beräkningar är rätt. I och med att balken beter sig som det är tänkt i lastfallet och att skillnaden på resultatet är 2,3 mm vilket är godtyckligt lite ger denna FEM-analys det komplement som behövs. Förmodligen så stämmer nog inget värde helt 100% med praktiken av det framräknade och FEM-analysen utan värdet är förmodligen något som är mitt emellan.

Lastfall 5:

Likt lastfall 2 gjordes även FEM-Analys för lastfall 4 och 5. Bilderna visar nedan visar uppställning för lastfall5 ihoptryckning av pelare och lastfallet av studien.

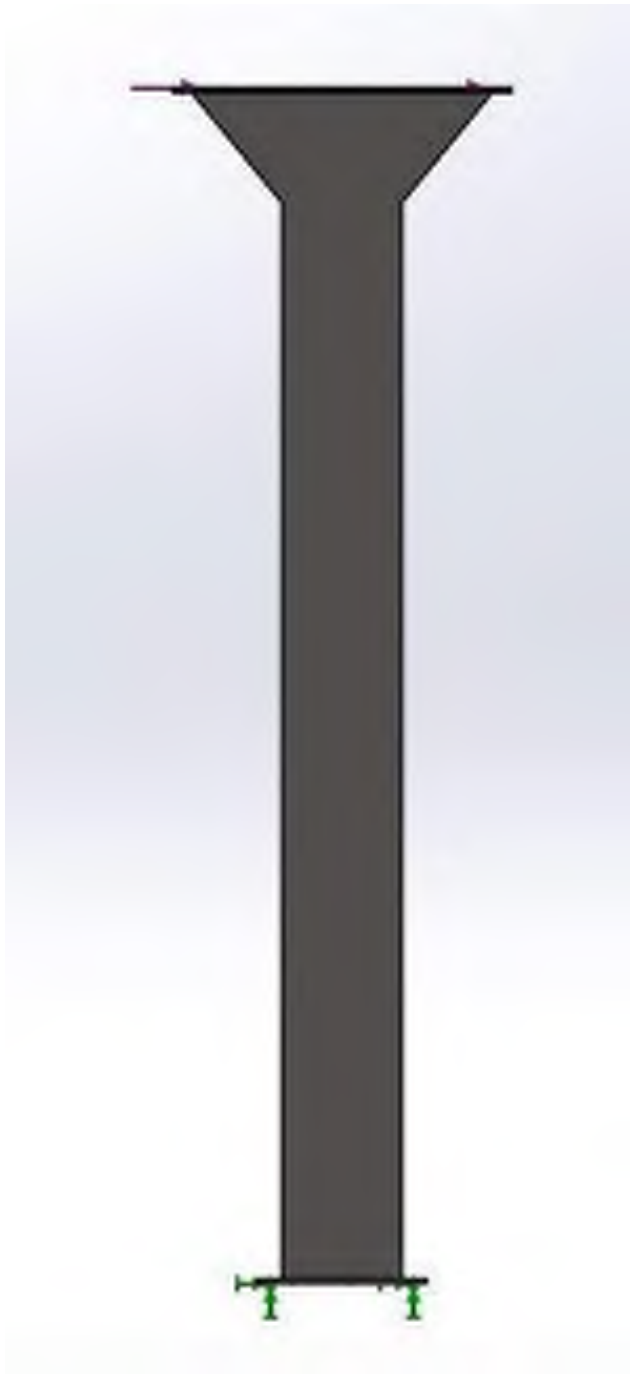


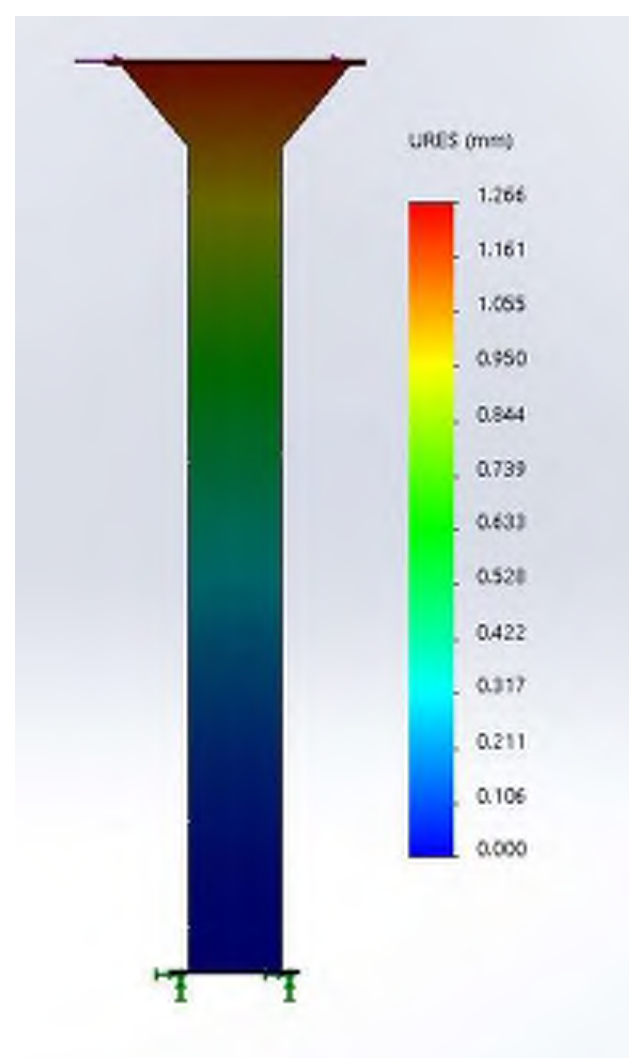


Likt denna fram beräknat resultat blev ihoptryckningen väldigt liten. Dock var skillnaden mellan analysen större i dett fall än i lastfall 2. Dock är det svårare att göra en korrektbedömning av vilket värde som stämmer när värdena är så pass små.

Lastfall 4:

Detta lastfall är för lastfall 4. Det är enbart fram beräknat på en pelare. Bilderna visar uåställningen av fallet och resultatet av studien.





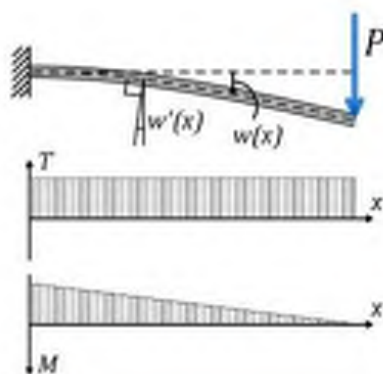
9. BILAGA 9 - ELEMENTARFALL

4.3.2 Elementarfall - nedböjning

Konsolbalk av längden L med E-modul E och yttröghetsmoment I ...

1.

... med punktlasten P i fria änden:

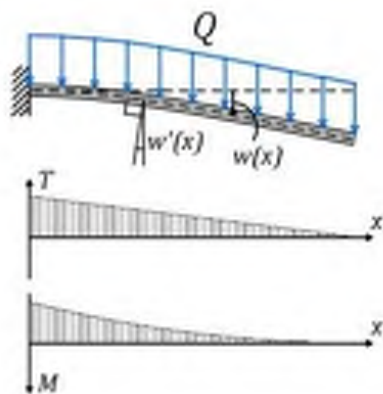


$$w(x) = \frac{PL^3}{6EI} \left(3 \frac{x^2}{L^2} - \frac{x^3}{L^3} \right)$$

$$w(L) = \frac{PL^3}{3EI} \quad w'(L) = \frac{PL^2}{2EI}$$

2.

... med konstant utbredd last Q :

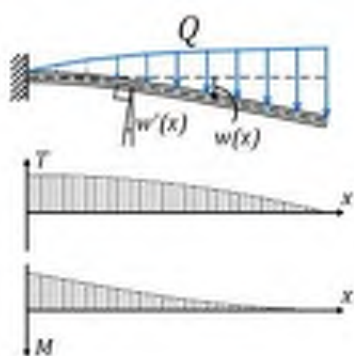


$$q(x) = Q/L$$

$$w(x) = \frac{QL^3}{24EI} \left(\frac{x^4}{L^4} - 4 \frac{x^3}{L^3} + 6 \frac{x^2}{L^2} \right)$$

$$w(L) = \frac{QL^3}{8EI} \quad w'(L) = \frac{QL^2}{6EI}$$

3.

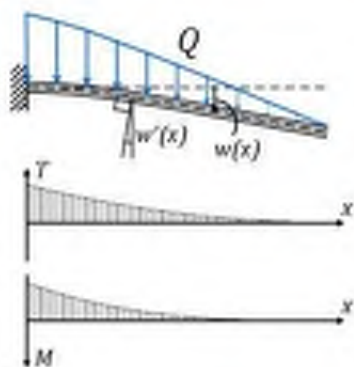
... med ökande utbredd last Q :

$$q(x) = x \cdot \frac{2Q}{L^2}$$

$$w(x) = \frac{QL^3}{60EI} \left(\frac{x^5}{L^5} - 10 \frac{x^3}{L^3} + 20 \frac{x^2}{L^2} \right)$$

$$w(L) = \frac{11 QL^3}{60EI} \quad w'(L) = \frac{QL^2}{4EI}$$

4.

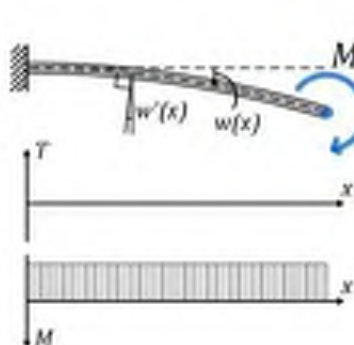
... med minskande utbredd last Q :

$$q(x) = (L-x) \cdot \frac{2Q}{L^2}$$

$$w(x) = \frac{QL^3}{60EI} \left(-\frac{x^5}{L^5} + 5 \frac{x^4}{L^4} - 10 \frac{x^3}{L^3} + 10 \frac{x^2}{L^2} \right)$$

$$w(L) = \frac{QL^3}{15EI} \quad w'(L) = Q \cdot \frac{L^2}{12EI}$$

5.

... med momentbelastning M i fria änden:

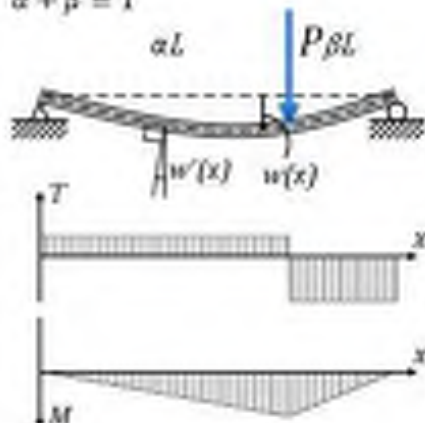
$$w(x) = \frac{ML^2}{2EI} \left(\frac{x^2}{L^2} \right)$$

$$w(L) = \frac{ML^2}{2EI} \quad w'(L) = \frac{ML}{EI}$$

Fritt upplagd balk av längden L med E-modul E och yttreghetsmoment I ...

6.

$$\alpha + \beta = 1$$



... med punktlasten P vid $x = \alpha L$:

$$w(x) = \frac{PL^2}{6EI} \beta \left((1 - \beta^2) \frac{x}{L} - \frac{x^2}{L^2} \right) \quad \text{då } \frac{x}{L} \leq \alpha$$

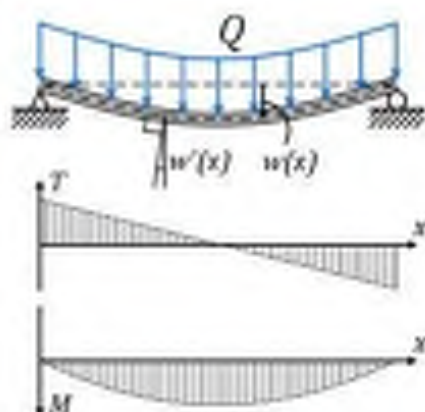
$$w(\alpha L) = \frac{PL^2}{3EI} \alpha^2 \beta^2$$

$$w_{\max} \text{ vid } x = L \sqrt{\frac{1 - \beta^2}{3}} \quad \text{då } \alpha \geq \beta$$

$$w'(0) = \frac{PL^2}{6EI} \alpha \beta (1 + \beta)$$

$$w'(L) = -\frac{PL^2}{6EI} \alpha \beta (1 + \alpha)$$

7.



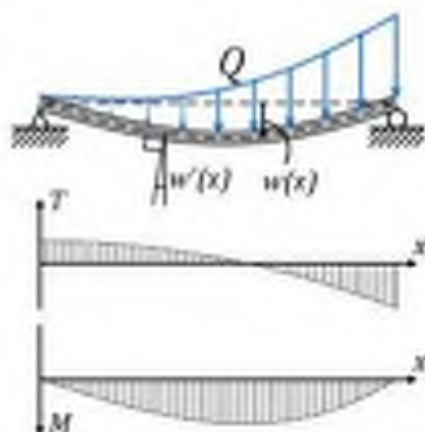
... med utbredd last Q :

$$w(x) = \frac{QL^2}{24EI} \left(\frac{x^4}{L^4} - 2\frac{x^3}{L^3} + \frac{x}{L} \right)$$

$$w\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{5QL^3}{384EI}$$

$$w'(0) = -w'(L) = \frac{QL^2}{24EI}$$

8.



... med ökande utbredd last Q :

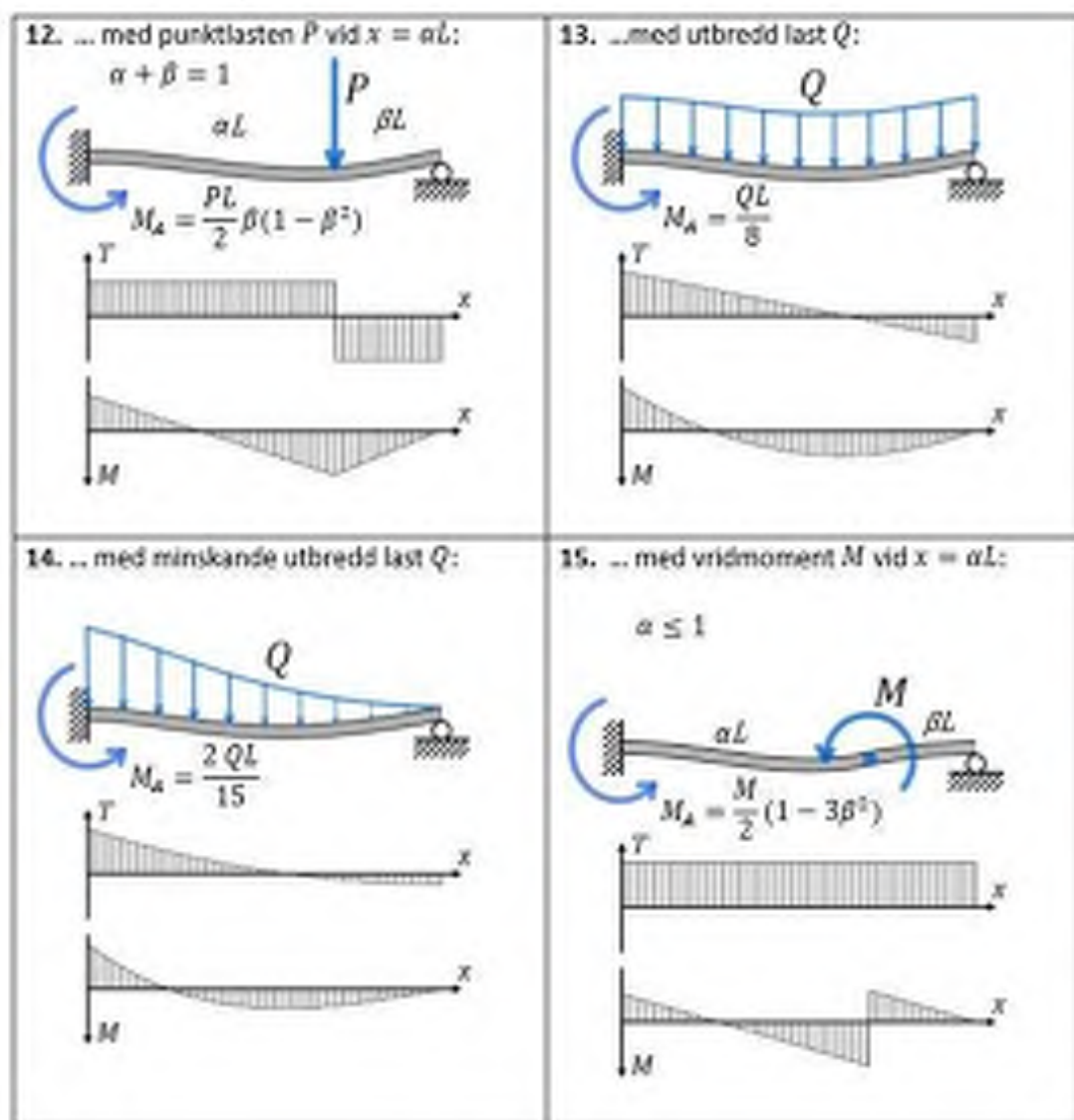
$$w(x) = \frac{QL^2}{180EI} \left(3\frac{x^5}{L^5} - 10\frac{x^3}{L^3} + 7\frac{x}{L} \right)$$

$$w'(0) = \frac{7QL^2}{180EI}$$

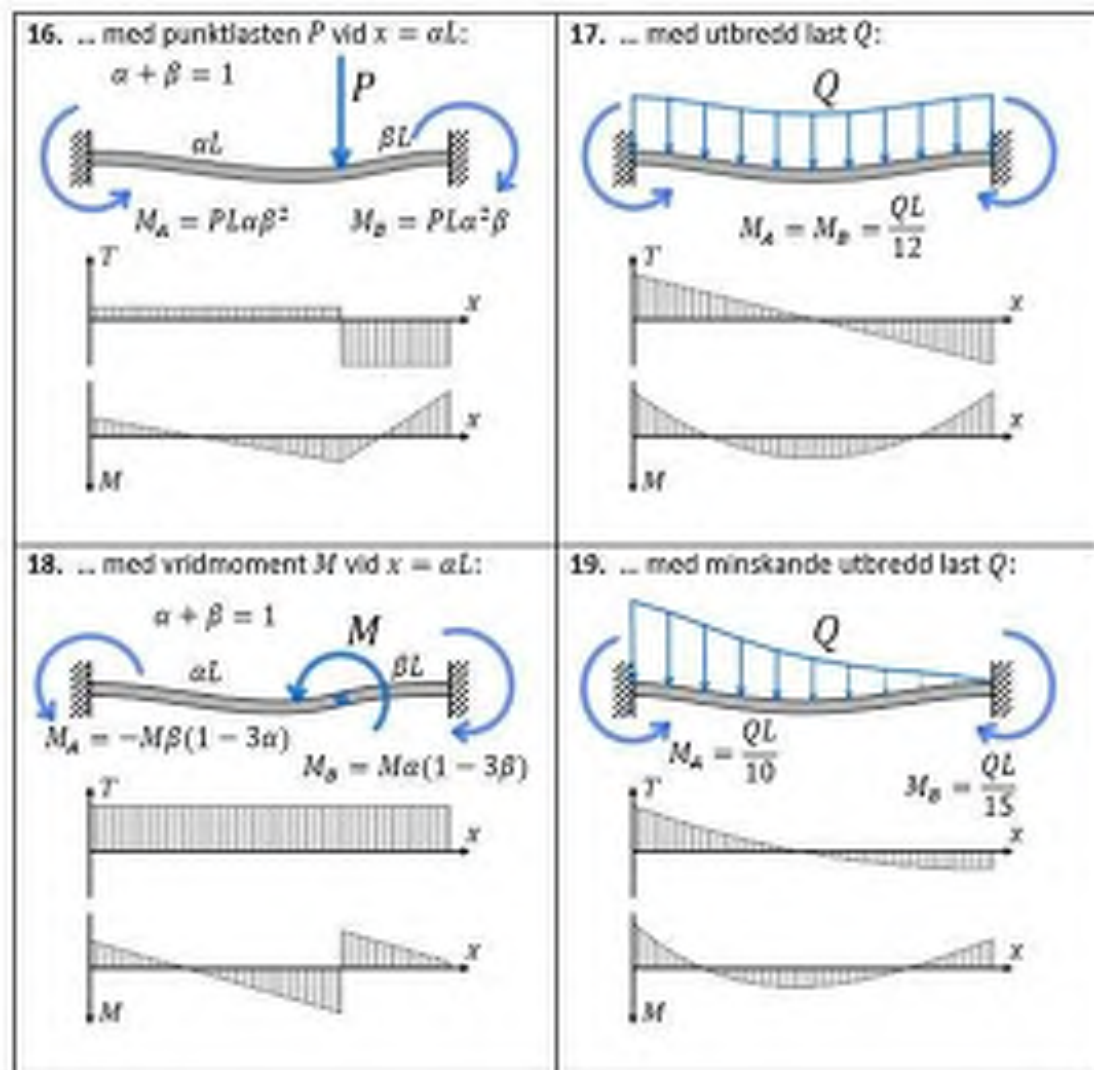
$$w'(L) = -\frac{8QL^2}{180EI}$$

4.3.3 Elementarfall - övertaliga stödreaktioner

Reaktionsmomentet M_A vid fast inspända änden för balk som är fast inspänd vid $x = 0$ och balk fritt upplagd vid $x = L$.



Reaktionsmomenten M_A vid $x = 0$ och M_B vid $x = L$ för balk av längden L , fast inspänd i båda ändar.





robotics

IRC5

Industrial Robot Controller



Based on more than four decades of robotics experience, the IRC5 is the robotic industry's benchmark in robot controller technology. In addition to ABB's unique motion control it brings flexibility, safety, modularity, application interfaces, multi-robot control and PC tool support.

Fast and accurate

The IRC5 gives our robots the ability to perform their tasks in a highly efficient manner. Based on advanced dynamic modelling, the IRC5 automatically optimises the performance of the robot by reducing cycle times (QuickMove™) and providing precise path accuracy (TrueMove™). Thanks to ABB's IRC5 technology, a robot's motion is predictable and its performance high, with no tuning required by the programmer. What you program is what you get.

Safe

Operator safety is a leading benefit of the IRC5. It fulfils all relevant regulations and is certified by third party inspectors world wide.

SafeMove™ represent a new generation of safety, enabling more flexible robotic cell safety concepts, e.g. enabling floor space reduction and collaboration between robot and humans.

Compatible

No matter where in the world your robot is located, and regardless of what regulatory standards apply, the IRC5 is up to the task. ABB's controller is compatible with various types of main voltages and can handle a broad spectrum of environmental conditions. IRC5 communicates with other machines in a manufacturing environment, in a safe and predictable way.

It supports the majority of all state-of-the-art industrial networks for I/O, sensor interfaces, remote access and a rich set of programmable interfaces are examples of the IRC5's many powerful networking features.

Programmable

All ABB robot systems are programmed with RAPID™, ABB's flexible, high level programming language. On the surface RAPID's basic features and functionality are easy to use, but dig deeper and you will find that this programming language allows you to create highly sophisticated solutions. It is a truly universal language on and off the shop floor which supports structured programs, and advanced features. It also incorporates powerful support for the most common robot process applications such as welding and assembly.

Reliable

The IRC5 is practically maintenance free, and its outstanding quality ensures unmatched up-time. Built-in diagnostic functions help ensure fast recovery and production restarts when operations are interrupted on the factory floor.

The IRC5 also comes equipped with remote monitoring technology, ABB Remote Service. Advanced diagnostics allow quick investigation of failures as well as real-time monitoring of the robot condition throughout its lifecycle, all made to increase your productivity.

Versions, a cabinet range covering every need. The IRC5 comes in different variants to provide a cost-effective and optimized solutions for every need.



IRC5 Single Cabinet Controller

- Designed for high IP protection and full expandability.
- Provides a protected environment for auxiliary equipment in the robot system.
- Capable of control of up to four robots in a MultiMove™ setup. Just add a compact drive module to each additional robot.
- MultiMove opens up previously unthinkable operations, thanks to the perfect coordination of complex motion patterns.

Technical information

Electrical Connections	
Supply voltage	3 phase, 200-690 V, 50-60 Hz
Physical dimensions	
Single cabinet	870 x 700 x 1700 mm
MultiMove drive modules	700 x 700 x 1700 mm
Weights	
Single cabinet	250 kg
MultiMove drive modules	130 kg
Environment	
Ambient temperature	0-45 °C, option 0-50 °C
Relative humidity	Max. 95% non-condensing
Safety	
	• SafeStop • Supervision of stand-still, speed, position and orientation • Robot end additional stop • 8 safe inputs for function activation • 8 safe monitoring outputs
Extended safety	
	• Two built-in function switches • 3 safe outputs monitoring exit • 3-7
Level of protection	
	IP54 (cooling ducts IP50)



IRC5C Compact Controller

- Offers the capabilities of the powerful IRC5 controller in a compact format.
- Delivers space saving benefits and easy commissioning through one phase power input
- External connectors for all signals and a built-in expandable 16 in, 16-out I/O system.

Technical information

Electrical Connections	
Supply voltage	Supply voltage: single phase 200-240 V, 50-60 Hz
Physical dimensions	
Dimensions	600 x 600 x 600 mm
Weight	30 kg
Environment	
Ambient temperature	0-45 °C
Relative humidity	Max. 95% non-condensing
Level of protection	
	IP50

ABB Robotik ist ein Unternehmen der ABB Ltd, 4003 Baden, Schweiz. Phone: +41 58 61 10 00.
ABB Engineering (Shanghai) Ltd, No. 4000, Xiangyin Highway, Pudong New District, Shanghai 200120, China. Phone: +86 21 5101 0000.

abb.com/robotics

Wir weisen Sie darauf hin, dass technische Änderungen in der Gestaltung der Dokumentation ohne Vorankündigung vorbehalten sind. Wir übernehmen keine Haftung für die Richtigkeit der Angaben in dieser Dokumentation. ABB ist nicht verantwortlich für Schäden, die durch die Verwendung dieser Dokumentation entstehen.

Wir weisen Sie darauf hin, dass die Angaben in der Dokumentation nur für Informationszwecke sind. Die Dokumentation ist nicht für die Verwendung in der Praxis geeignet. Die Verwendung der Dokumentation ohne Vorankündigung ist nicht zulässig. Die Verwendung der Dokumentation ist nur für Informationszwecke geeignet.



100(5) PMU, Panel Mounted Controller

- Comes without a cabinet
- Can be integrated into any enclosure for customisation or for special environmental requirements

Statistical Information

Electrical Common Values	
Supply voltage	3-phase 200 volt's 50-60 Hz
Physical	
Dimensions	
Control module	171 x 188 x 211 mm
Drive module small	171 x 438 x 220 mm
Drive module large ¹	445 x 408 x 424 mm
Weight	
Control module	12 kg
Drive module small	28 kg
Drive module large ²	40 kg
Environment	
Ambient temperature	0-40°C
Relative humidity	Max. 95% non condensing
Safety	Safetronics Supervision of speed, anti, speed, position under/overrun (includes additional axes) 6 safe inputs for function activation 8 safe monitoring outputs
Enhanced safety	Emergency Position Switches 6 safe outputs monitoring axis 1-6
Level of protection	IP50

© 2000 Blackwell Science Ltd, *Journal of Internal Medicine* 247: 395–402



IEEE 802.1P Priority Control

- Provides full control of the paint process by integrating hardware and software seamlessly
- Reduces cycle time, saves paint, and is environmentally friendly.
- Is certified as an associated equipment for interfacing manipulators/equipment for hazardous location.
- The BCSF FlexPaint Pendant is Ex certified for use in hazardous locations, includes soft keys, a dual joystick, a 3.5 inch back lit screen, supports Asian language characters and has an emergency stop.
- Includes Roboweb 5, which automatically adapts the robot system to the specific paint application.

Psychiatric information

Electrical Characteristics	
Supply voltage	2.0V to 5.0V @ 50-400 kHz
Physical	
Dimensions	1.43" x 1.23" x 1.00 mm
Weight	1.60 kg
Environmental	
Endurance	100,000 cycles @ 100 Hz 100,000 cycles @ 100 Hz 100,000 cycles @ 100 Hz 100,000 cycles @ 100 Hz 100,000 cycles @ 100 Hz
Ambient temperature	Max. 90°C non-condensing
Relative humidity	0-95%
Level of protection	IP64

© 2007 ASH
4525 Ash Boulevard
Hyattsville, MD 20781
Phone 410.278.1000
www.ash-usa.com

[illegible]

the owner has right to make ongoing changes to study the contents of the document online prior to any bid-opens or purchase orders, the agreed-upon financial growth will have no impact on responsibility whatsoever for getting work or materials to the construction site, as agreed.

We reserve all rights to this document and its content. No reproduction, distribution, or use in any form is permitted without the express written consent of A&P.
www.aandp.com

Human Machine Interaction, tools for every need RobotStudio® is a powerful PC tool that interacts with the IRC5 on-line as well as off. On the shopfloor, the FlexPendant or a standard Windows tablet is ideal to jog, calibrate and program your robot system.



RobotStudio Online

RobotStudio Online is a suite of tablet applications for shop floor operations. Utilising the familiar and user-friendly nature of tablets, these applications make it easy to perform operations such as calibration, editing programs or jogging.

Combined with either an ABB Jukab Safetythree position enabling device or a T10 jogging device safety is not compromised.

The T10 jogging device also give you the ability to operate the robot quickly and easily using intuitive gestures in a simple and efficient way.

Technical information, T10 Jogging Device

Environment	
Functions	60 mm - Joystick (not used for enabling) - Joystick with button - Functionality 1.40" display - Membrane keyboard with 33 buttons
Safety functions	- Emergency stop 2-position enabling switch (dead circuit)
Level of protection	IP54

FlexPendant

The FlexPendant is characterised by its clean, color touch screen-based design and 3D joystick for intuitive interaction. Powerful support for tailor-made applications, e.g. operator screens.

Technical information, T10 Jogging Device

Environment	
Functions	- Graphical color touch screen - Joystick - Port plug: Addressview - During operation - Membrane keyboard with 33 buttons - USB Memory support
Safety functions	Emergency stop (3 position enabling switch (dead circuit))
Level of protection	IP54

Technical information, HMIkit & Three position device

Environment	
Functions	LED status lights
Safety functions	- Emergency stop 2-position enabling switch (dead circuit)
Level of protection	IP55

ABB RobotStudio is a registered trademark of ABB. All other trademarks are the property of their respective owners.

ABB Engineering (Singapore) Ltd.
No. 100, Singapore Street
Singapore 100010
Phone: +65 6349 0000

abb.com/robotics

We warrant the right to make corrections, changes or modify the contents of this document without prior notice. ABB is not responsible for any errors or omissions in this document. ABB does not accept any responsibility whatsoever for indirect, special or punitive damages arising out of the use of this document.

We warrant the right to make corrections or changes to this document and to the subject matter and functions and to the software. Any reproduction, distribution or use of this document without the prior written consent of ABB is prohibited. ABB does not accept any responsibility for indirect, special or punitive damages arising out of the use of this document.

11. BILAGA 11 – ANTECKNINGAR OCH DISKUSSIONS PUNKTER FRÅN INTERVJUER

Denna bilaga innehåller sammanslagen information ifrån intervjuer där det redovisas frågeställningar samt diskussionspunkter inför mötena och konversationerna. Intervju objekten som har kontaktats har varit alla inom utvecklings avdelningen för varje företag.

Detta visar de mest centrala frågeställningarna som har ställts och jobbats med och vilka som har frågats. Vid genomsökning av anteckningar och dokumentation har det varit svårt att kunna få ihop och redovisa alla anteckningar som har gjorts.

Detta ger en bild över de mest centrala frågeställningarna:

[Diskussions anteckningar och frågor med möte med Andon Automation 2018-01-11:](#)

Diskussionspunkter:

Varianter av grantrys

- Fördelar / Nackdelar med varianterna

Variant 1:



Variant 2:



Hastigheter förändras möjligen? Tyngd??

Motorer

Tillverkningsmöjligheter:

- Maskiner
- Material
- Dimensioner på detaljer
- Bearbetning utav gränssnitt

Noggrannhet

- Toleranser

Mäta in på plats

- Metod för att mäta in komponenter på rätt plats
- Kalibrering?

Montering rent allmänt

Hur noga kan man få det utan att skimsa?

Vill få det noga utan att behöva kalibrera.

Drömmen är ju att bygga utan att behöva mäta in och skimsa, kalibrera

Rimligt?

Utomhus gantry

- Erfarenhet av detta?
- Hur stor påverkan gör temperatur förändringar

Drivning

- Kulskruv eller kuggstång?

Styrning

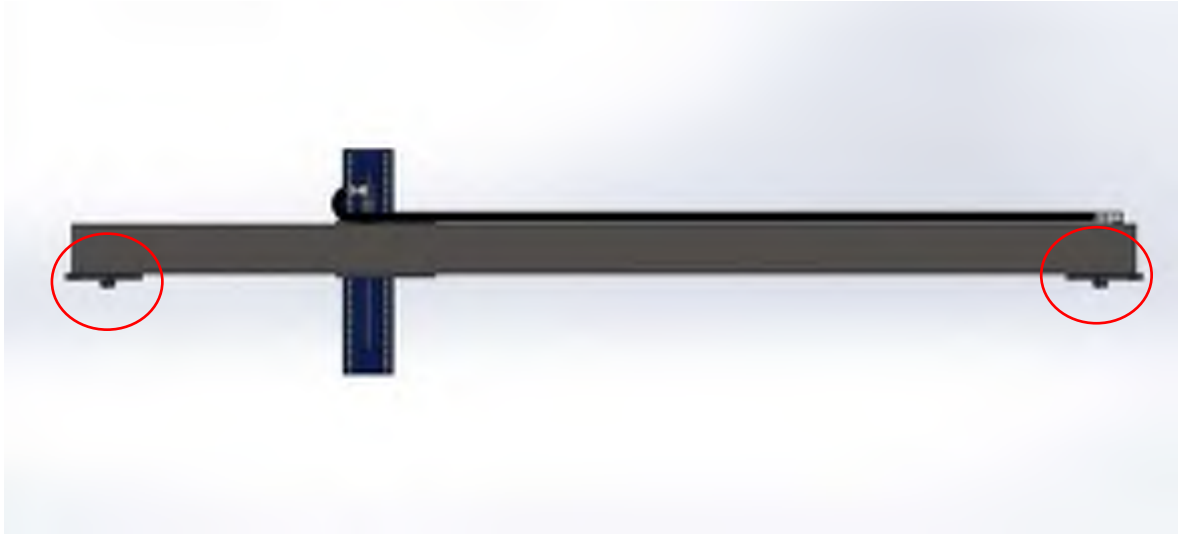
- Linjärstyrning eller räls

Kabeldragning

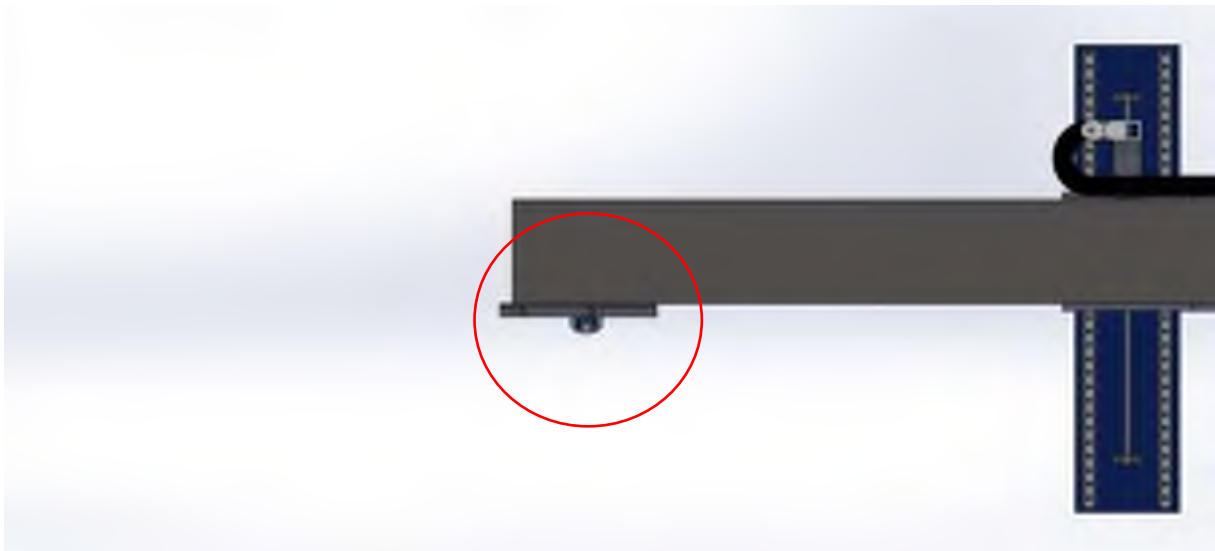
- Alternativa lösningar för det? Pratade med en av era kollegor som förespråkade en skena som leder ström.

Problem

Har en fundering jag skulle vilja diskutera över vid montering. Ska försöka förklara till bästa förmåga i text. Tänker som så att om traversbalken sitter fast inspänt på båda ändarna. Markerar vart jag menar i bilden nedan med röd ring:



Inzoomat vid röd ring:



Styrningen här gör att balken är låst i alla riktningar på båda ändarna av balken utom i själv rörelse riktningen, som i det här fallet är in och ut ur bilden

Detta ger fördelen att om allt sitter rätt så blir det väldigt precist och stabilt vilket är de egenskaperna som man vill åt med den här gantryn.

Problemet är dock att det är väldigt snäva toleranser med linjär styrningarna som man jobbar med, vilket gör att om andra delar sitter lite snett eller lite fel i gantryn (vilket det förmodligen är något man bör räkna med) så kommer det få negativa konsekvenser för konstruktion. Typ påtvingade spänningar och slitage när traversbalken rör på sig eller monteras.

Om man då istället tillåter större toleranser för att få allting att passa vid styrningarna så förlorar man egenskapen av den exakthet som man vill åt.

Förhoppningsvis gör jag mig tillräckligt tydlig för att skapa förståelse av det problemet jag försöker formulera. Annars får jag försöka förtydliga när vi ses på torsdag.

Men frågan är då hur man tacklar det här problemet. Ska man använda en styrning som inte låser i alla riktningar? Större toleranser? Rörlig i en sida?

Eftersom det här även är en utomhuskonstruktion då temperaturförändringar även spelar roll så känns det här problemet ännu mer aktuellt.

Sammantagen frågeställning i konversation med ABB februari 2018:

Övergripande över uppgiften:

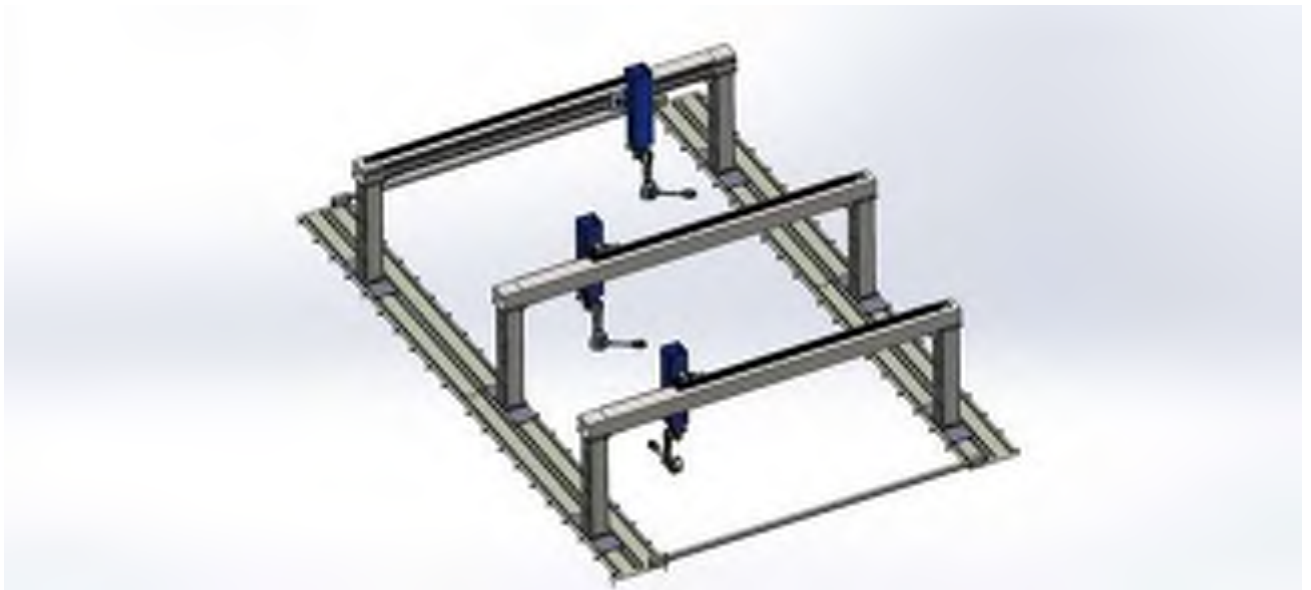
Som sagt uppgiften går ut på att se över och konstruera koncept för ett robotgantrysystem. Det är ett ganska stort system med 3 robotar som ska kunna röra sig i X-, Y- och Z-led.

Nedan skickar jag med 2 koncept bilder som visar varianter av gantry:n:

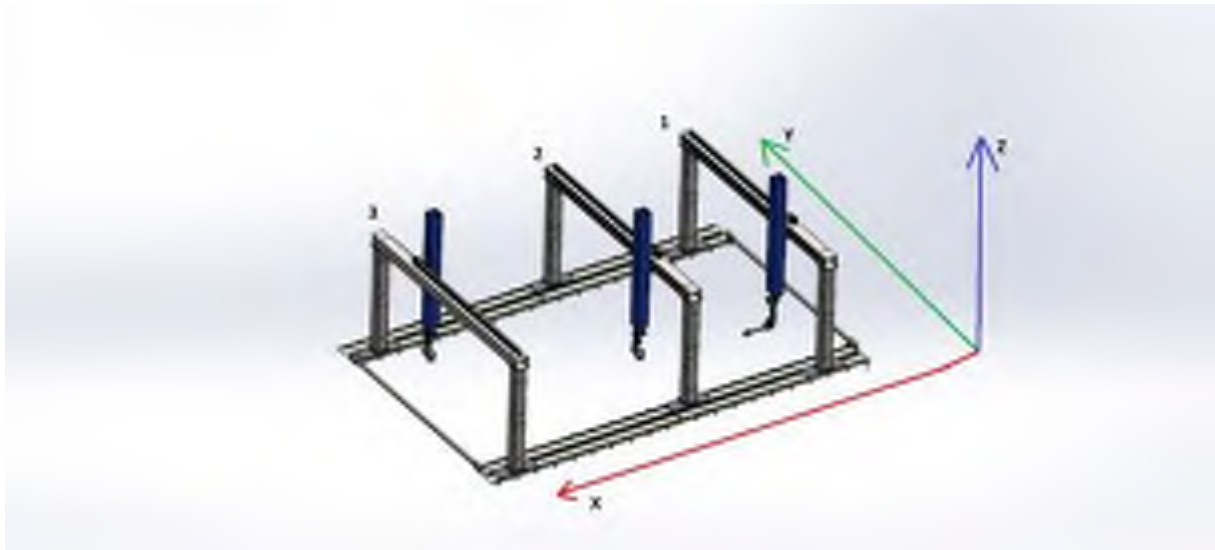
Koncept 1:



Koncept 2:



Nedan här visar jag en varianten av gantryn där jag benämner vilken axel som är X-, Y- och Z-led.



Det är ett ganska stort system. Sträckan i X led är 20 meter, I Y-led är det 12 meter och i Z-led är det 6 meter. Tanken är att robotarna som sitter på är av modellen IRB-4600.

Men för att driva hela detta krävs ganska många motorenheter och drivmoduler. Det är det jag vill gå igenom och se om jag har tänkt ätt. Koncepten är väldigt lika varandra när det kommer till hur jag har tänkt att placera kontrollerna och motorenheterna.

För att driva en Balk är tanken att det ska vara 2 motorenheter på vardera sida om "Y-balken" som driver balken i X-led. Väljer att ha 2 st på vardera led som driver i X-led för att undvika "byrålåde-effekten".

För att driva den blå stickan i Y-led krävs ytterligare en motorenhet och en till motorenhet för att driva den blå stickan upp och ner i Z-led.

Således krävs alltså 4 motorenheter per balk (2 för X-led, 1 för Y-led, 1 för Z-led) och 1 robot per balk.

Det betyder totalt 12 motorenheter totalt samt 3 IRB-4600. Motorenheten som jag har tänkt är MU400.

Det blir lätt ganska snurrt med hur man ska göra med kontrollern för detta system samt hur man ska göra med tillägg av drivmoduler och kabeldragningen och se över alla axlar.

Eftersom det också ska vara ett rörligt så ska de flesta kablarna vara flexkablar.

Har haft lite kontakt som sagt innan med Peter Johansson. Fått hjälp där och utifrån det kommit på ett sätt att koppla ihop detta system. Men i och med att man nästan maxar vad som är möjligt att göra samt att det är en del specialkablar så skulle jag gärna vilja kolla om jag har tänkt rätt. Samt är det vissa kablar i min primära kabeldragning som jag inte är helt säker på funkar.

Vidarebefodrade mejlkonversationen som jag hade med Peter, Där ser man en del data som jag har utgått ifrån. Bland annat att det går att göra 50 m flexkablar mellan drivmodul till Robot. Så det är

bland annat en specialkabel jag använder. Funderar även över om det går att ha en lika lång flexkabel mellan motorenhet och SMB-Box?

I dokumentet Kabeldragning_1 så skickar jag över en bild över hur jag har tänkt att man kan koppla ihop det. Det är som sagt en hel del specialkablar. De svarta kablarna är sådana kablar som inte behöver vara flex-kablar. Kablarna till robotarna är 50 meter flexkablar. Som sagt är jag osäker på om det funkar med 50 meters flex-kablar mellan SMB-Box och Motorenhet.

Detta är variant 1 som jag har tänkt på och då står alla kontrollers och drivmoduler vid sidan av gantry:n Men har tänkt över lite olika varianter då drivmodulerna och controllern åker med robotbalken om detta inte fungerar.

Utöver att gå igenom detta system så har jag lite frågor om motorenheternas tekniska data.

Den datan jag undrar över är för att beräkna hur stor växellåda som behövs för att driva alltihop och den datan jag tänker på befinner sig på sidan 23 i det här dokumentet:

<https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3HAC040147-001&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>

Jag kollar då i kolumnen för motorenheten MU400:

Undrar då om jag tolkar rätt för om raden som heter:
”Trms: torque @ rms speed (Nm)”

och

”Nrms: speed @ rms torque (rpm)”

Ger varvtal och utgående moment från Motorn vid en sorts medelanvändning? Det är de värde jag använde för att räkna hur starka motorerna är för att beräkna växellåda. Men är lite osäker på om det är rätt värden att utgå ifrån för att driva balkarna?

Skulle även vilja gå igenom hur högt spänningsfall det blir för systemet och strömförbrukningen av systemet.

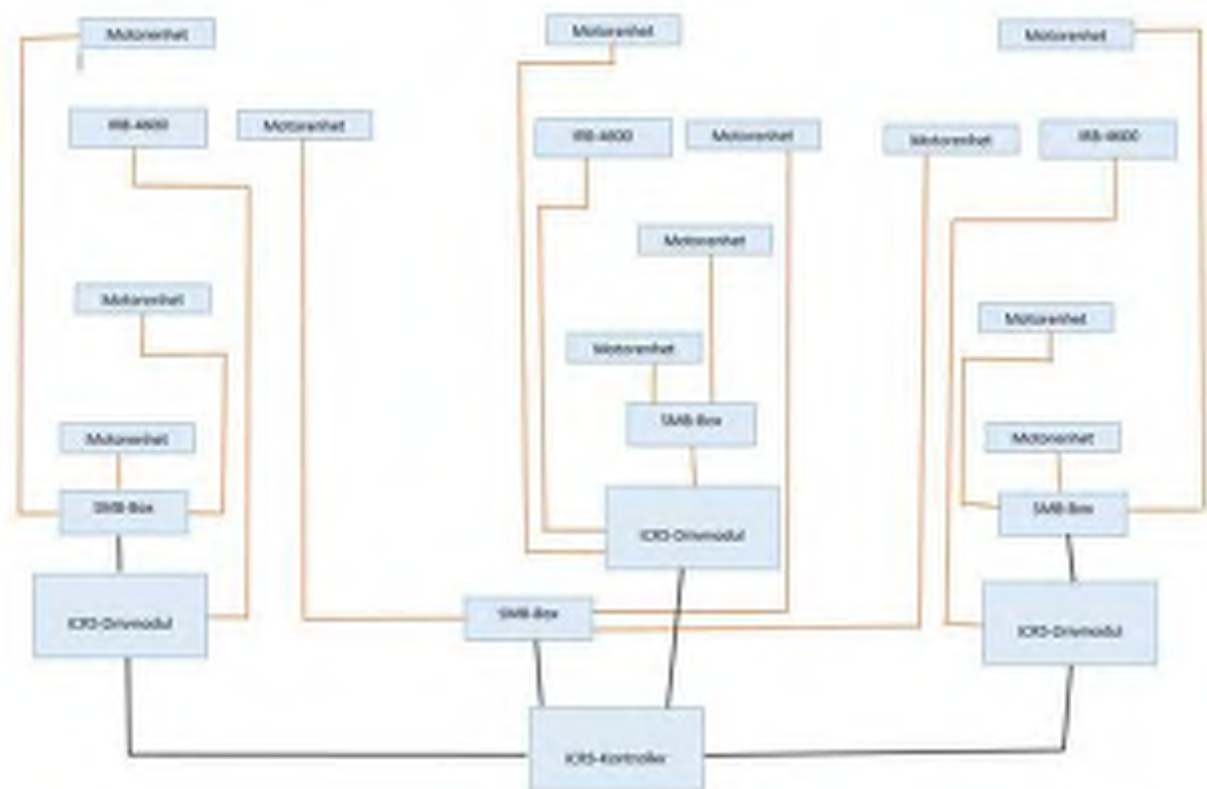
Så kort och gott, gå igenom om hela Systemet fungerar, strömförsörjningen i sådana fall samt om jag har tolkat teknisk data rätt för motorenheterna för att räkna rätt växellåda som orkar driva hela systemet?

Övriga dokument som jag har utgått ifrån är:

http://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=ROB0109EN_G&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch

<http://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=ROB0295EN&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>

Medföljande bild till frågeställningen:



Sammantagen frågeställning mot conductix angående kabeldragning 2018-02-27

Har kikat igenom kabeldragningen en del nu och pratat en del med ABB. Har inte riktigt fått all information från ABB än så vissa grejer är obesvarade. Men har tänkt kabeldragning nu som jag är rätt säker på kommer att fungera. Har nog tillräckligt med information för att du ska kunna hitta lämpliga kabelkedjor för ändamålet.

Bifogar med lite bilder som är till för att hjälpa till att förklara. Hittade tyvärr inget proffsigt sätt att illustrera det. Har försökt göra det så pedagogiskt som möjligt men ursäkta oproffsigheten i bilderna.

Bild 1: visar huvudkonceptet som det är.

Bild 2: Visar X-, Y-, Z-led Samt benämner de olika ”portalerna” 1,2,3.

Bild 3: Visar hur vi diskuterade hur kabelkedjorna blir lämpligast att dra. 2 stycken i X-led på ena sidan som går till portal 1 och 3. Sen en kabelkedja i X-led på andra sidan som går till portal 2.

Sen finns det en kabelkedja som går i Y-led ovanpå varje portal samt en som går i Z-led för varje portal, visas även det i Bild 3.

Det är en hel del kablar som krävs men tar det steg för steg. Först och främst är det den här strömkabeln som vi diskuterade som ska gå till varsin drivmodul och till hjärnan som är kontrollern (hjärnan). Den kabeln måste vara en 3 fas kabel som förmodligen måste klara 63 ampere. Spännings specifikationen är fortfarande mellan 200-600 volt. Har inte riktigt fått klart för mig hur hög spänningen kommer bli.

Med det i åtanke så har jag skrivit ner vilka kablar som är tänkt att befinna sig i kabelkedjorna och hur lång sträcka de behöver kunna transportera kablarna. Skriver även hur mycket utrymme varje kabel behöver. Så måttet bredvid varje kabel är diametern på kabeln +1 till 2mm.

kabelkedja X-led:

10 meter lång

Plats för:

- strömkabel för kraft – vet ej diameter
- signalkabel mellan kontrollern och drivmodul – 15 mm
- signalkabel mellan kontrollern och verktyg – 15 mm
- tryckluftsslang – 15 mm

Kabelkedja Y-led:

12 meter lång

plats för:

- Signalkabel robot – 25 mm
- 2 st Signalkabel motorenhet – 25 mm (25 mm var, så 50 mm totalt)

-signalkabel verktyg – 15 mm
-tryckluftslang – 15 mm

Kabelkedja Z – led:

3 meter lång

plats för:

-signalkabelverktyg – 15 mm
-tryckluftslang – 15 mm

Egentligen så är Stickan som utgör Z-led 6 meter, men jag tänker mig att kabelkedjan kan vara mitt monterad som i fallet med X-led vilket gör att den bara behöver vara 3 meter lång.

Skickar även med en bild på hela kabeldragningen och varje del som ingår i systemet. Har ritat det som så att de orangea kablarna är ABB:s kablar, De blåa kablarna är 3-fas ström kabeln, de gula kablarna är signalkablarna från kontrollern till verktyget och de gröna kablarna är tryckluftslangarna.

De kommer behövas kabelstege också. Tänkte att man kunde sätta det längs pelarna för portalerna som leder upp till balken som utgör y-led. På pelarna tänkte jag att det då kommer behöva vara en kabelstege som kablarna kan fästa emot som leds in mot kabelkedjan för y-led och z-led. Den delen är ju inte rörlig och därför räcker det då med en kabelstege.

Vet inte om ni jobbar med kabelstegar men om ni gör det får du jättegärna kolla upp det med.

Kabelstege:

5,4 m lång

Ha plats för:

-Signalkabel robot – 25 mm
-3 st Signalkabel motorenhet – 25 mm (25 mm var, så 75 mm totalt)
-signalkabel verktyg – 15 mm
-tryckluftslang – 15 mm

Det blev ganska mycket det här, förstår om det finns frågor och om det är otydligt någonstans så är det bara att fråga. Värt att komma ihåg också är att det ska kunna klara att vara utomhus också.

Angående det andra konceptet som jag visar på bild 4 så blir det samma specifikationer då man kan dra kablarna på väldigt liknande sett.

Här några punkter jag skulle behöva diskutera kring konstruktionen.

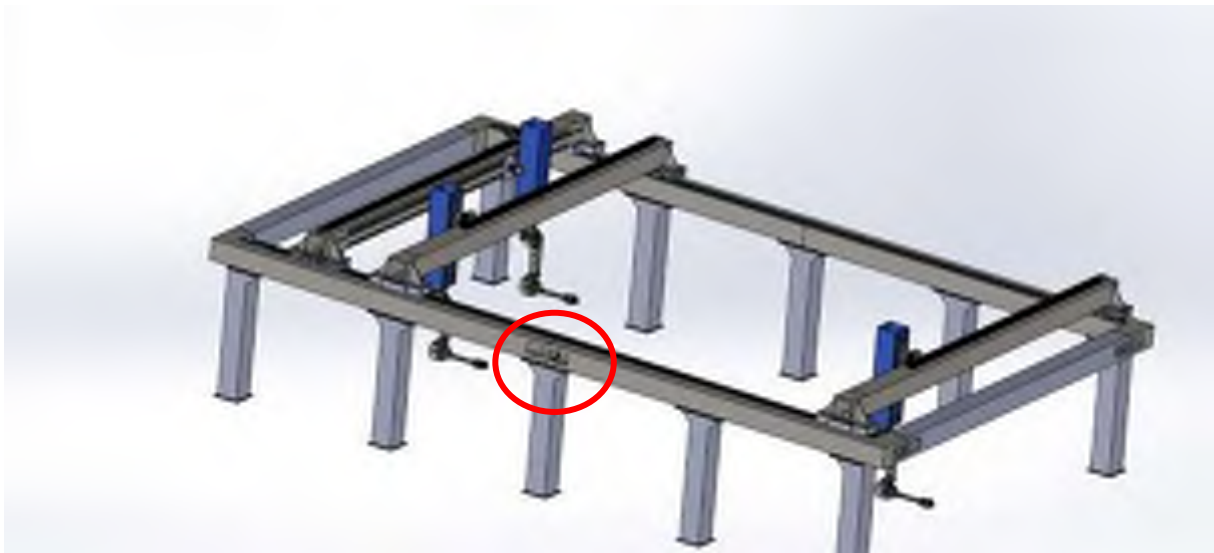
- **Val av Motorer**

- Denna punkt kan man gå igenom lite enkelt, Kan ju i princip räkna det med $F = Ma$ och dimensionera efter det så jag tror jag vet hur man gör men det är mest det att det är svårt att veta exakt när motorn blir för liten och den inte orkar driva gantry:n. Ju mer jag räknar på det kan jag i princip ha hur liten motorn som helst bara det att accelerationen blir mindre och mindre.

- **Skarv**

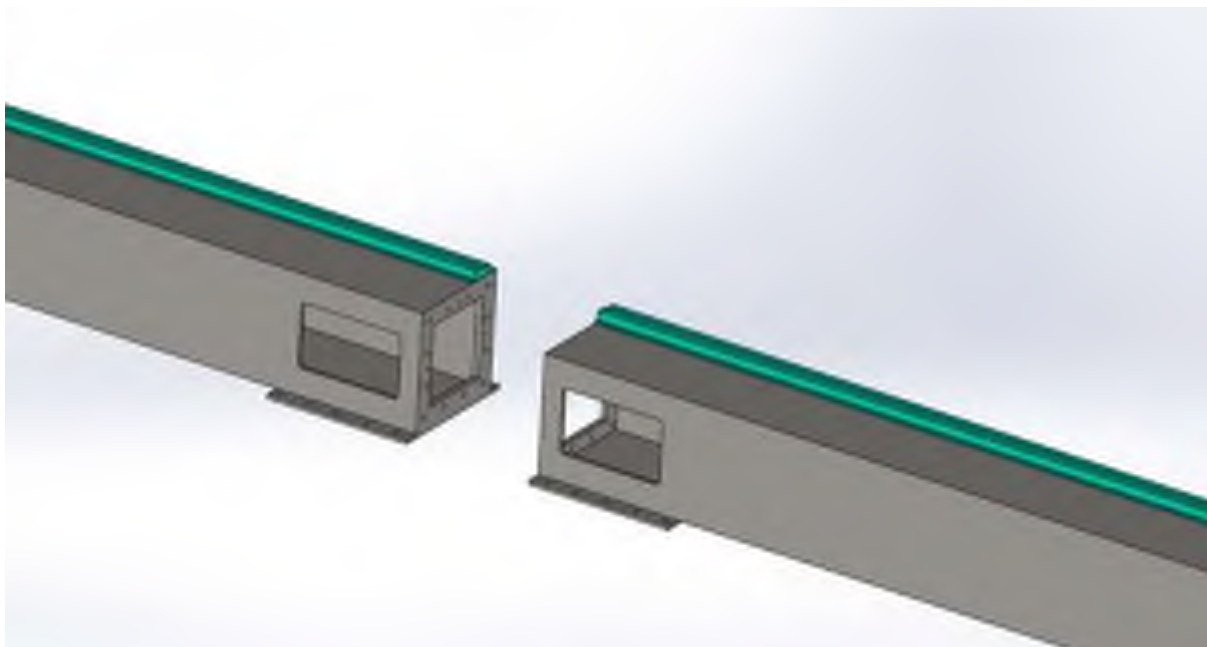
- Har lite problem med en jobbig skarv i konstruktionen. Ska försöka visa:

Här är konstruktionen i dagsläget:



Skarven är inringad med röd cirkel.

Inzoomat för skarven så ser det ut så här när jag även har separerat balkarna:



Styrningarna ligger ovanpå de gröna detaljerna så jag vill ju matcha in skarven så precist som möjligt. Än så länge jobbar jag med en idé kring styrcinnar men jag vet inte om det finns en bättre idé så att man kan matcha in balkarna så de styr in på rätt sätt och matchar varandra med så lite glapp som möjligt.

Skulle även vilja diskutera lite lastfall, hålf och om jag måste räkna med svetsklasser, Samt visa även lite hur styringen fungerar nu för att ta upp fel vid värmetsvigning etc.

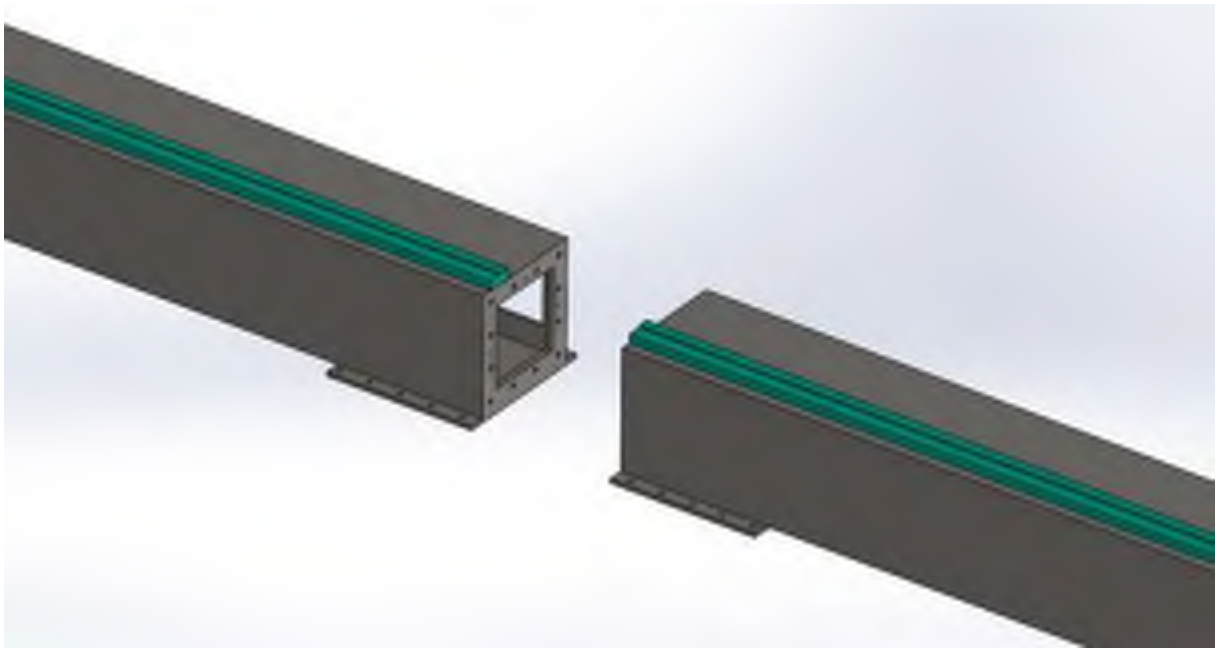
När det kommer till hålfen så tänker jag bara om jag kan dubbelkolla så jag har tänkt rätt för att räkna yttröghetsmomentet för en fyrkantsprofil samt om jag tänkt rätt med elementarfallet som tillkommer.

Styrning – hur den tar upp felen

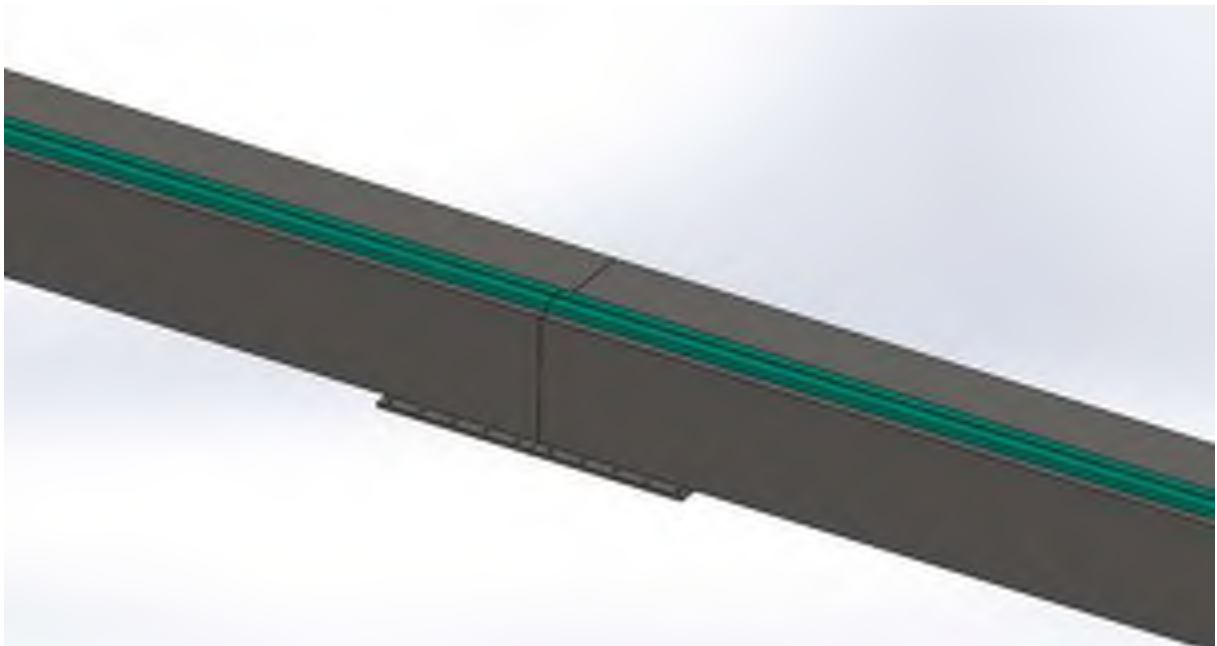
Bearbetning av stor balk

Målet med just den här bearbetningen är att lyckas sammanfoga de här balkarna på ett bra sätt så att de linjerar bra ihop

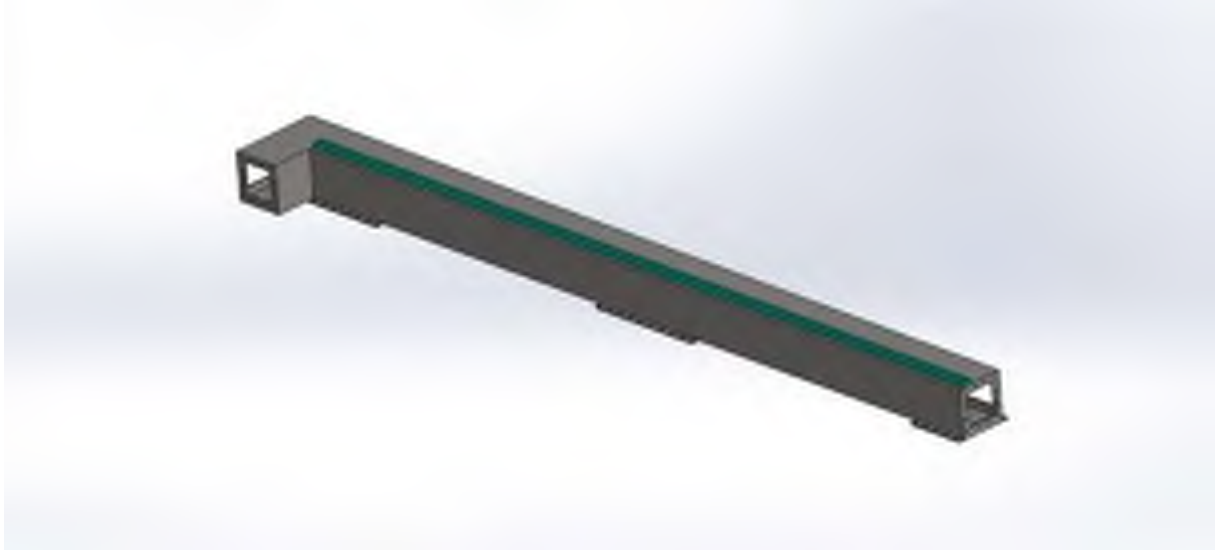
Balkar isär:



Balkar ihop



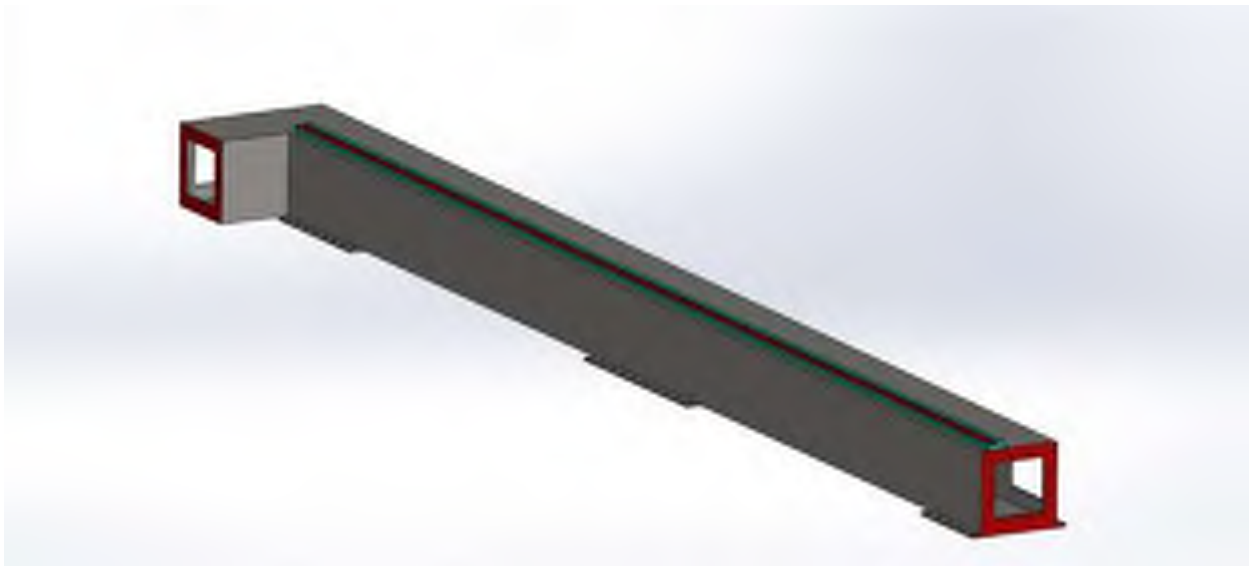
Här är bild på en enskild balk

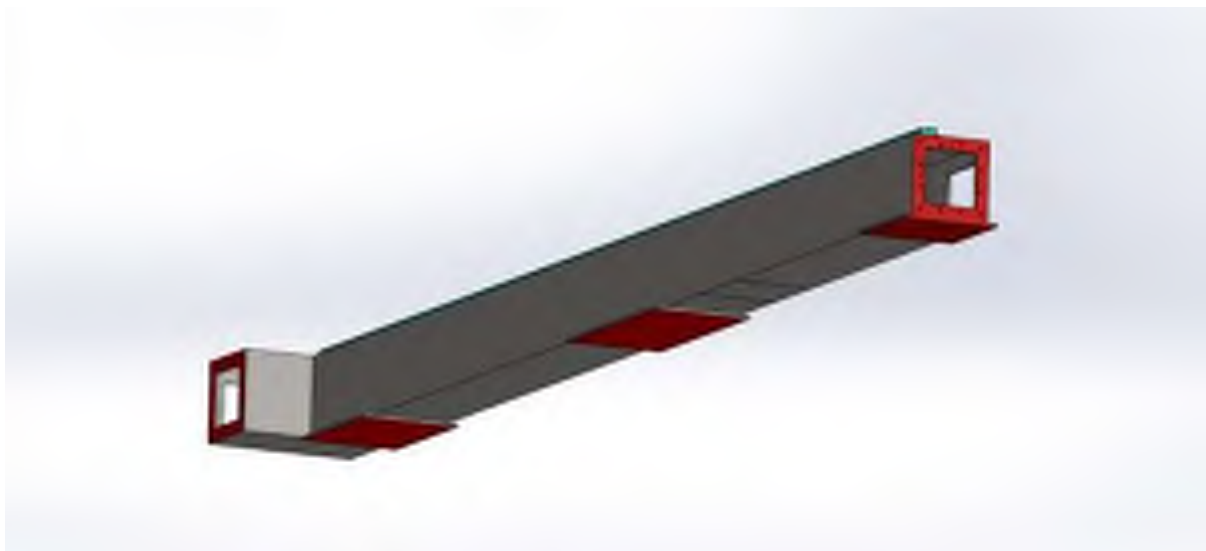


Balken är ihopsvetsad av vanligt konstruktionsstål. Den gröna detaljen som ligger ovanpå balken är ett plattjärn som har svetsats på.

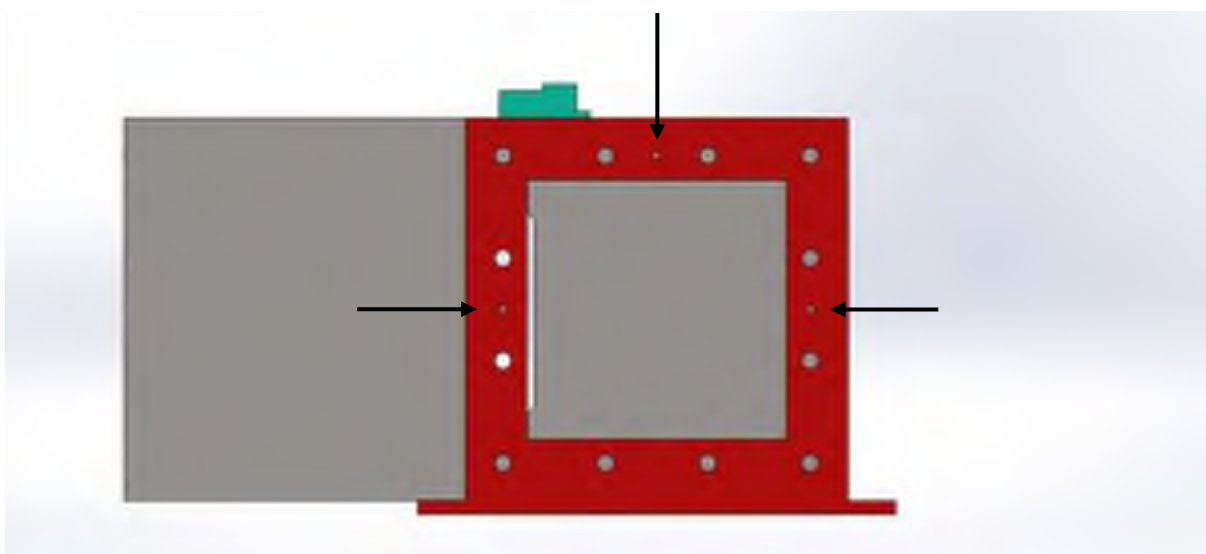
Det som skulle behöva bearbetas är ytorna till gränssnitten. Alltså ytorna på flänsförbanden och en del på plattjärnet som ligger på. Där är tanken att det ska planas. Min fundering kring imorse rör sig runt om det även går att göra styrpinne håll i flänsen där en likadan balk ska mötas som jag visar i de 2 första bilderna.

Följande 2 bilder visar där det är tänkt att planas markerat med röd färg.





Nästa bild är inzoomat vid flänsen där styrpinnehållen är tänkt att sitta:



De tre svarta pilarna pekar på hålen. Funderingen är då om man kan komma in från sidan och borra/fräsa till de hålen.

De två nästa kommande bilderna visar lite urklipp från ihop skissade ritningar med mått som jag tror är relevanta i ärendet.

Kom ihåg dock att det fortfarande är konceptuellt och inga mått är något som när huggna i sten. Till exempel så är nog diametern för styrpinnarna lite kläna förmodligen. Men hoppas tankebannan når fram ändå. Svårighet är att få balkarna att linjera emot varandra väldigt precist.

Så frågan är väll om det är möjligt att bearbeta på det sättet som är tänkt? Även hur noga kan man få det? samt om du möjligen har ett annat förslag än styrpinnar för att få balkarna att linjera mot varandra?



Slutrapport SBUF 13556

Referens nr 11

MASTER THESIS

Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Engineering at the University of Applied Sciences Technikum Wien - Degree Program Mechatronics/Robotics

Physics Engine for simulation of dynamic behaviors in rebars

By: Sebastian Staudinger, BSc
Student Number: 1410331013

Supervisor 1: Dr. Dipl.-Ing. Kemajl Stuja
Supervisor 2: Josef Holmner

Gmunden, September 8, 2016



Declaration of Authenticity

“As author and creator of this work to hand, I confirm with my signature knowledge of the relevant copyright regulations governed by higher education acts (for example see §§ 21, 42f and 57 UrhG (Austrian copyright law) as amended as well as § 14 of the Statute on Studies Act Provisions / Examination Regulations of the UAS Technikum Wien).

In particular, I declare that I have made use of third-party content correctly, regardless what form it may have, and I am aware of any consequences I may face on the part of the degree program director if there should be evidence of missing autonomy and independence or evidence of any intent to fraudulently achieve a pass mark for this work (see § 14 para. 1 Statute on Studies Act Provisions / Examination Regulations of the UAS Technikum Wien).

I further declare that up to this date I have not published the work to hand nor have I presented it to another examination board in the same or similar form. I affirm that the version submitted matches the version in the upload tool.”

Gmunden, September 8, 2016

Place, Date

Signature

Kurzfassung

Weltweit werden Käfige auf Baustellen aus Bewehrungsstahl benötigt. Dabei sind mehrere Arbeiter gleichzeitig mit Schweißen und Draht wickeln beschäftigt, um die Stahlstäbe miteinander zu verbinden. Unter schmutzigen und generell schlechten Bedingungen, wird über mehrere Wochen hinweg ein solcher Käfig erstellt.

Künftig soll dieser Vorgang jedoch automatisiert werden. SKANSKA will als erstes Unternehmen Roboter zur Erzeugung eines Bewehrungsstahlkäfigs verwenden. Drei dieser Maschinen, ausgestattet mit Greifern und Schweißwerkzeugen, arbeiten hängend an der Konstruktion. Die dabei verwendeten Stäbe sind bis zu 12 Meter lang. Der, alleine durch das Eigengewicht entstehende, Durchhang dieser kann nicht vernachlässigt werden.

Aus diesem Grund soll eine Physics Engine zur Simulation der dynamischen Bewegungen dienen. Dieses Werkzeug dient dazu, physikalische Verhalten von Prozessen darzustellen oder die Eigenschaften von Objekten zu berechnen. Zuvor ist eine Evaluierung vorgesehen, wodurch eine passende, kostenlose Version ausgewählt werden kann. Ein Add-in für ABBs Simulationssoftware soll zur Kommunikation zwischen den Robotern und der Physics Engine dienen. Mögliche Zusammenstöße sollen durch eine Kollisionsverhütung ausgeschlossen werden, beziehungsweise die Roboter in eine bestimmte Routine versetzen, sollte es dennoch zum Aufprall eines Bewehrungsstahls mit dessen Umgebung kommen.

Schlagwörter: Bewehrungsstahl, Stahlkäfig, Physics Engine, Roboter, ABB, SKANSKA, Robotdalen

Abstract

Cages of reinforcing bars (rebars) are built all over the world. Workers are manually welding or tying those reinforcing cages with wires together. This work's environment is dirty and the conditions are bad. Several people are working for a few weeks on completing such a construct. SKANSKA is developing a gantry, which is creating such a rebar cage automatically. Three robots, equipped with grippers and welding tools, carry and connect the bars. Up to 12 meters long steel parts are moved by the automatic machines. The slacking of those rebars cannot be ignored. Therefore, integrating a physics engine should calculate their dynamic behavior. A physics engine is used to show physical behaviors of processes or to calculate object's properties. A collision detection should be possible with that instrument. Furthermore, the robot's acceleration and speed can be adapted to be aware of touches with the environment. A freeware physics engine is requested by the customer. An evaluation for finding a system, which fits into the demands of this project, needs to be done in advance. Additionally, an add-in for ABB's simulation software RobotStudio should provide the possibility of communication between the engine and the robot's programming application.

Keywords: rebar, rebar cage, physics engine, robot, ABB, SKANSKA, Robotdalen

Acknowledgements

First of all, I want to thank Robotdalen for giving me the chance to go, to Sweden, for working on my master thesis there. The organization in advance was great and my colleagues have always been absolutely helpful. Operating on a project for a big corporation like SKANSKA was a magnificent experience and I learned a lot for my whole life.

I want to say thank you to Mr. Stuja as well. His support in writing this master thesis was great. His requests have been formulated absolutely clear, which made working with him very pleasant.

I am also grateful to Mrs. Randles for helping me getting financial support from the National Agency Erasmus+ Education. Even though time was limited between my decision of going to Sweden and my actual flight, she managed to get things done in time.

Table of Contents

1	Introduction	1
1.1	Motivation	1
1.2	State of the art	2
1.3	Task description	2
2	Introduction of the partners of this project.....	4
2.1	SKANSKA Asphalt & Betong AB	4
2.2	Robotdalen	4
2.3	Mälardalens Högskola (MDH)	4
3	Concept for implementing a physics engine	6
4	Building a concrete construct	7
4.1	Manual installation of a rebar cage	7
4.2	Process automation.....	8
4.2.1	Description of the gantry.....	8
4.2.2	Description of the rebars.....	9
4.2.3	Description of the robots	11
4.2.4	Description of the bending machine	12
4.3	Impact of automating the system	13
5	Detailed description of the automated gantry	14
6	Additional sub-projects for this automatic system	20
6.1	Miniature model	20
6.2	Robots' tools	20
6.2.1	Gripper	20
6.2.2	Welding pistol.....	22
6.2.3	Tying gadget	23
6.3	Bending machine.....	23
7	General information of game physics	26
7.1	Description of physics engines.....	26
7.2	Description of game engines	28
7.3	Types of physics engines.....	29
7.4	Different game engines	30
7.5	Criteria for choosing a game engine.....	32
7.6	Choosing physics engines	32
8	Method and synthesis	34

8.1	Process of development	34
8.2	Elicitation of data	35
8.3	Product development method.....	37
9	Practical realization	39
9.1	Analytical calculations	39
9.1.1	Conditions for the calculations.....	39
9.1.2	Description of the calculations	40
9.1.3	Results of the calculations	41
9.2	Selection of suitable physics engines	42
9.3	Used programs	42
9.3.1	Microsoft Visual Studio	42
9.3.2	ABB simulations software RobotStudio.....	44
9.3.3	Code transfer between different programming languages.....	45
9.4	Program code development	50
9.4.1	Procedure of programming	50
9.4.2	Physics engine	51
9.4.3	Simulation of the moving rebar.....	70
9.4.4	Manual for using the physics engine	72
9.4.5	Add-in for RobotStudio.....	74
10	Test period.....	76
10.1	Practical tests	76
10.2	Code tests	76
10.3	Gained knowledge.....	76
11	Results	78
12	Summary	80
13	Outlook.....	82
	Bibliography	84
	List of Figures	86
	List of Tables	87
	List of Abbreviations.....	88

1 Introduction

In almost every piece, made out of concrete, reinforcing bars (rebars) are used. They give more stabilization and strength. Those rebars are wrapped up in concrete. In case of big constructions, the iron parts are provided in so called rebar cages. The more such constructions grow, the bigger, those cages get of course.

Creating this kind of rebar cages is still a manual process nowadays. Therefore, many workers are necessary. It takes several weeks for completing these casings for big train bridges for example. Not all of the rebars are used in straight form. Some of them need to be bended on one or even both ends. Wires are used to connect the rebars at their crossovers. But also welding is used to fix the rebars to each other. So far, these cages are built on the construction company's premises or are outsourced to other factories. Moving those cages over wide distances after they are finished, needs high logistical effort.

It would save a lot of money, if the transport for that huge rebar cage was not necessary anymore. That's why SKANSKA is working on a gantry, which builds those casings exactly, where they are needed or at least close to it. So only a crane for lifting it, is necessary. Using three robots, which work autonomously, will revolutionize the process of building a rebar cage. Included is a bending machine as well, which forms and cuts the straight rebars into their needed shape. More than one coil is situated next to this machine because the diameters of the iron bars can vary up to 32 mm.

Time is a big factor for SKANSKA's idea for producing rebar cages in the future. Using robots instead of human workers will also increase the time, which is required to build up such a casing. Those machines can finish a cage, depending on its size of course, in several hours. So far, humans need a few weeks. This fact shows, how revolutionary this idea is and how many advantages it can bring for the future of constructions.

1.1 Motivation

Creating a rebar cage for a huge train bridge with pillars, which are hundreds of meters high, is still done by hand. A huge amount of workers is necessary to be able to produce such a casing. They sometimes need months to complete those cages. Additionally, they have to be moved to their final spot, where the bridge will be located. An exceptional freight haulage is necessary to be able to move those heavy goods.

Creating such a gantry, which can build up a rebar cage on its own, without any human help, is a completely new way for this kind of challenge. No construction company in the world has developed anything similar yet. It will revolutionize time and efficiency of creating those steel cages. A big advantage is also that this gantry is build up, wherever the constructions are situated. So those casings are created pretty close to its final location, which means that

there is no need of special transportation systems. A crane can lift them up and set its position.

Based on the fact, that those used rebars are up to 12 meters long and only 32 mm thick, their bending cannot be ignored. Therefore, it is necessary to calculate – and additionally simulate – their dynamic behaviors. To be aware of collisions, a visual simulation will be used to see dangerous situations in advance. A physics engine shall be implemented to this project to have some kind of observing tool, which warns the programmers about any accidents before transferring the code to the real robots. Also the robot's grippers need to be designed. In addition, the best gripping position must be chosen. A miniature model of this gantry will be created to get a better understanding its realization.

1.2 State of the art

It is common for construction companies around the world to build rebar cages manually. There is no system, which creates those casings automatically. This project, realized by SKANSKA, is a worldwide unique project. Consequently, there are no similar, existing gantries like this. Therefore, this corporation has already several patents to save this idea. There is nothing available, which could be used as a model. Instead of “copying” and improving, everything needs to be designed from the scratch. Therefore, a miniature model is created, which will help to get a better understanding of the single steps and their combination. The robots' jobs are basically pick-and-place or welding exercises. Nevertheless, it is a technical challenge to insure that the gantry is working properly.

1.3 Task description

A physics engine has to be implemented in an existing simulation environment, ABB RobotStudio. This engine will be used to visualize dynamic behaviors of rebars. This work is divided into two phases. First of all, information about the requirements of this project need to be gathered. Additionally, open source physics engine solutions should be evaluated. The next phase consists of an implementation of a first version of the physics engine in ABB RobotStudio.

A physics engine needs to be chosen, which calculates the movements of the bars, while the robots are manipulating them. The physics engine will work as an external computing unit. This means that data is exported from RobotStudio and sent back to the engine. The dynamic behavior will be established and transferred to the simulation environment. If possible, the visualization should be integrated into RobotStudio. The simulated straight and stiff rebars should be replaced by dynamically moving parts.

Showing the rebars' motions should additionally help to avoid collisions. If any crashes would be detected, the programming code can be adapted to change the robot's paths. It is important to be aware of any possible collisions. Otherwise the gantry could not be operating without any observing persons.

This thesis is part of a bigger project. This means that agreements with all the other sub-projects are necessary to implement the other's progress. Regular meetings will take place to synchronize the level of knowledge and support each other. Based on the fact that all sub-projects are connected really close to each other, those conferences are really important. They are helpful to receive and give support from and to the others. Based on different forms of education, everyone had various ideas for one task.

2 Introduction of the partners of this project

SKANSKA came up with the idea of automating the rebar cage production. They were looking for a partner with knowledge in robotics. Robotdalen, which is specialist in working with robot application, was an attractive choice for this kind of project. This company is owned by Mälardalens Högskola, which made it easier to find students, who should collaborate with the companies on realizing SKANSKA's idea.

2.1 SKANSKA Asfalt & Betong AB

SKANSKA is one of the most important Swedish construction corporations. They are not only building single family houses. This company is more famous for their huge bridges and multiple dwellings, roads or cultural buildings, such as museums or concert houses. SKANSKA is operating multinational and has more than 40,000 employees.

Heading up with today's technologies is a very important aspect for this company. Improving their processes and the ongoing development of performances count as typical strategies of this construction corporation. These might be the reasons for coming up with this project. Automating this kind of process is a complete new way to build rebar cages. This will minimize the time that is currently needed for manufacturing such a construct. This unique idea will furthermore speed up the whole process of building a bridge or similar constructs, where huge rebar cages are needed.

Depending on the size of those cages, the number of workers varies, as well as the needed time to finish them. Using robots also keeps the individuality of the reinforcing bars. They are flexible enough to create different types and sizes of those rebar cages. They are actually only limited by the size of the gantry itself. This project will revolutionize the whole construction industry. It makes SKANSKA become more attractive for contracts in the future because of better time performance in completing a construction, compared to their opponents.

2.2 Robotdalen

Robotdalen is a subsidiary of Mälardalens Högskola. They are working on new robot innovations. Focused on technical solutions for industry, service and healthcare, they are also attractive partners for big, international companies. Robotdalen is concentrated on developing solutions with robotics, which is based on detected requirements. The end user is strongly integrated into the whole process. The company has a lot of experience in the sector of product development. [19]

2.3 Mälardalens Högskola (MDH)

Mälardalens Högskola is one of Sweden's largest institutes of higher education with one branch in Västerås and a second in Eskilstuna. MDH has more than 14,000 students and

offers 52 different programs. Besides that, this University keeps close partnerships with companies and the public sector in the province Västmanland. It is often strongly cooperating with Robotdalen. This University offers possibilities to students, who can work on their bachelor or master thesis at their subsidiary Robotdalen. Based on this win-win-situation, it is easy to find attractive projects on the one hand and interested students on the other hand. Also in this project, four students from Eskilstuna were working on their bachelor thesis.

3 Concept for implementing a physics engine

For the gantry in this project, robots from ABB will be used. This company offers a simulation software, which is called RobotStudio. The whole process can be simulated and also tested in there. The rebars do not have any dynamical behavior, they are static bars, even if they are moved by the robots. Collisions can only be estimated by the programmer.

To avoid real possible crashes, a physics engine is necessary. This tool shows, how the rebar behaves under different circumstances. The bending of such long and at the same time quite thin materials cannot be ignored, when it is going to get realized. Therefore, some calculations of an engine, which can calculate dynamical movements, is absolutely necessary.

Nowadays, the market offers several physics engines, which have different specifications. First of all, they are using various programming languages, such as C/C++, C# or Python. Another distinction is the usage, depending on their specific field of application. Some of them are better for fluids, others are used for rigid bodies. Predefined criteria should help to find the engine, which fulfills the demands.

After choosing one of the available open source engines, the data, which is required from RobotStudio, must be defined as well. The way, how these information is transferred between the simulation software and the physics engine shall be established too.

4 Building a concrete construct

In this chapter, it will be first explained, how a rebar cage is built manually. This is the standard procedure nowadays. Afterwards, SKANSKA's idea of improving this process is described in detail. The result is to save for example money and time. SKANSKA is the first company in the world, who is working on such a kind of gantry to automate building rebar cages.

4.1 Manual installation of a rebar cage

The process of building a rebar cage is depending on its structure. Either it is a smaller cage, or a long-term used. Smaller ones are built differently than long-term cages. The method is depending on its size. But it is not easy to specify, which method is used only depending on the construct's size. Complexity of the casing plays as well a role, as the available space for building the cage directly besides the construction.

If the concrete construct is not too big, the rebar cages are built manually by workers directly at the construction place. They are either welding the reinforcing bars or connecting them with wires. Depending on the company's standards, mostly only one method is used. Is it not possible to build the rebar cage directly on the construction, those casings are produced in factories? Machines are welding the rebars automatically there. This method is mostly used for pillars. It saves a lot of time, if machines are used. The completed steel construction is transported by trucks to the construction afterwards. Cranes are also needed to lift them up and place them, where they are needed. This form of building a rebar cage saves a lot of uncomfortable work and helps to improve the employee's working conditions. Deciding for one of the two methods is based on financing, personnel, quality and access to appropriate equipment.

Before a rebar cage can be built, it shall be designed. Specialists are necessary, who decide, which diameters, lengths and supporting beams are needed. Static calculations are helpful or even necessary to prove that the cage is strong enough to support the concrete afterwards. The designers of those constructs also choose the way of connecting the bars. The more often used method is connecting the reinforcing bars with. It is easier and all the workers can do it because there is no need of education like for welding. It is not always possible to build the rebar cage exactly where it is needed. So a crane is necessary to lift and move it to its correct position.

The casting of concrete into the finished rebar cages depends on which environmental conditions the construct must deal with. In some cases, the design should withstand large temperature changes or have longer life than others. This sets great demands on the casting of concrete. When taking strong weather changes, temperature conditions and concrete mass into consideration, the thickness of the concrete needs to be selected. It is transported

in liquid form to the construction and gets filled in by concrete truck mixer. It is either pumped directly into the cage or a crane with a hose can be used as well, if the truck cannot reach it (see Figure 1).

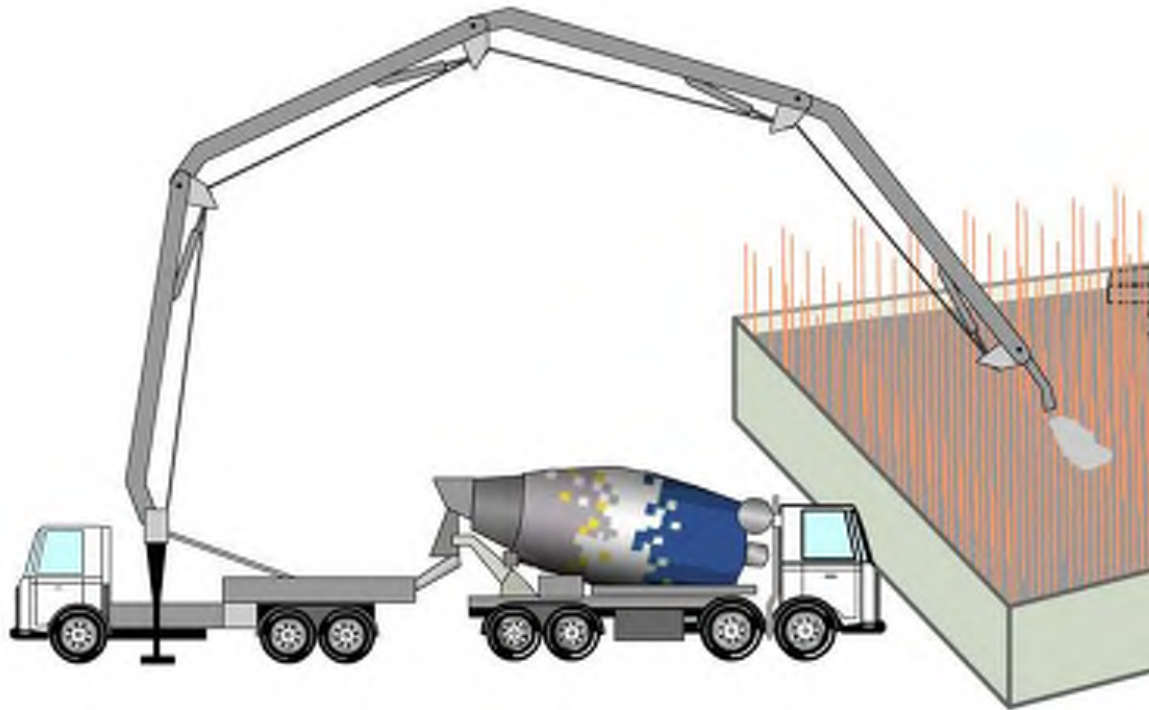


Figure 1: Illustration of casting concrete with a crane (Source: [21])

4.2 Process automation

After the description of how a rebar cage is built manually, SKANSKA's project idea will be explained. The gantry will be shown and described. It is also mentioned, which impact it will have on constructions in the future.

4.2.1 Description of the gantry

Figure 2 shows the whole gantry, which will be used to create rebar cages. 4 pillars, connected with girders, will carry three robots. Depending on the size of the needed cages, the gantry will be designed appropriately. As already mentioned, it will always be located next to the construction, if possible. This saves money for the otherwise necessary special carriage of heavy goods for the cage. Only a crane is needed, which lifts the finished cage to its final location.

Additionally, Figure 2 displays the bending machine for the rebars in the rear section. Four coils of steel, with different diameters, are visible. Depending on the rebar cage, the number of necessary coils needs to be adapted.

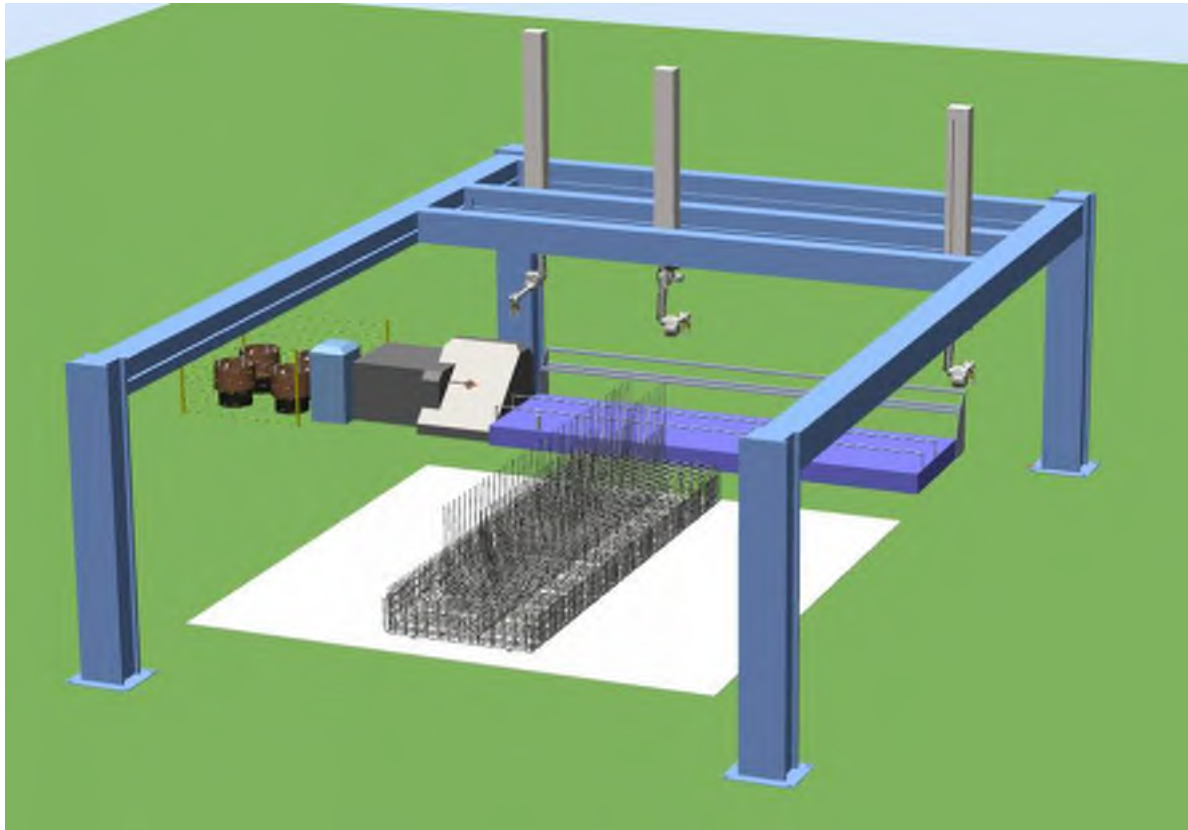


Figure 2: Screenshot of the gantry in RobotStudio

4.2.2 Description of the rebars

Nowadays, there are many different forms in which rebars can be delivered. The ordered bar's shape is according to their usage afterwards. Depending on how and what they are needed for, the appropriate mold is used. The most important shapes are:

- Straight bars
- Coils
- Grids

The most used shape is the straight bar because its application is quite flexible. They just have to be cut at their needed lengths. All the others, which have specific shapes, cannot replace straight bars. Rebars on a coil must be pulled off and cut. A strong machine is required to get them straightened before use. Besides that, the thicker rebars need to be cut by a machine as well because it is not possible to do it manually anymore.

The rebars' steel is produced according to DIN 488. This material is hot-rolled and afterwards warm-treated in the steel factory. Straight rebars are highly ductile according to DIN 1045-1 and also fully weldable. [3]

Size and length of the straight rebars are internationally given. Table 1 shows the available lengths combined with diameters, if they are not on a coil:

Length Diameter	6 m	10 m	11 m	12 m	13 m	14 m	15 m	16 m	17 m	18 m
6 mm	X									
8 mm	X			X		X	X			
10 mm	X			X		X	X			
12 mm	X			X		X	X			
14 mm				X		X	X			
16 mm				X	X	X	X	X	X	
20 mm		X	X	X	X	X	X	X	X	X
25 mm		X	X	X	X	X	X	X	X	X
28 mm		X	X	X	X	X	X	X	X	X
32 mm				X						

Table 1: Length-diameter combination for rebars ([3])

Rebars, which are delivered on a coil, weight up to 2,500 kg. The diameters comply with table 1, but the length is variable because of the weight per meter. For this project, different diameters are necessary, which means that more than one coil is needed.

The rebars for this project are different in size and form. There are four different shapes, which the bending machine can generate out of straight bars. Figure 3 shows those types:

A: The straight one, which needs to be cut in length as needed.

B: At the “L”-form, the horizontal, as well as the vertical part can be different in length.

C: Also at the “U”-rebar, all three sides need to be set. In actually all cases so far, the two vertical pieces are the same size.

D: This one is actually very similar to B with the difference that the angle is less than 90°.

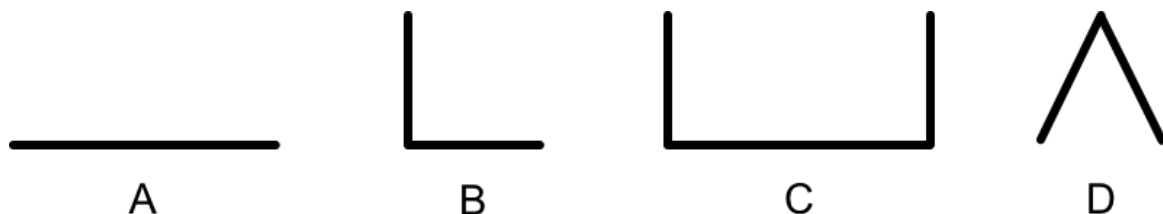


Figure 3: Different shapes of rebars

The current upper limits for type A rebars are 12 meters in length and 32 millimeters for their diameter. As already mentioned, those reinforced bars are regulated in norms. Only six of the available ones can be chosen for producing a cage in this project. So far, the bending machine can only handle six coils.

4.2.3 Description of the robots

For this gantry, three ABB six-axis jointed-arm robots are used. ABB is a Swedish-Swiss multinational corporation with its headquarter in Zürich, Switzerland. One of the biggest and most important robotic offices is in Västerås. This is only one reason, why this brand of robot was chosen. Robotdalen is working together with ABB in lots of other projects as well. Those two companies are strongly supporting each other and keep a deep relation for years already.

The type of the robots for this project is already decided, but can be adapted in case of smaller cages. At the moment, ABB IRB 4600 (see Figure 5) is used for the simulation. Those machines can move in all three dimensions, which is unavoidable to reach all necessary points around the rebars.

This robot is known for its flexible mounting possibilities. It can be fixed in various ways, on the floor, semi-shelf, tilted or even hanging. Its cycle times was reduced by 20-25% compared to its precursors. The IRB 4600 is with 400 kg a light weight on the one hand, but with 1.73 m reach down a wide range robot on the other hand (see Figure 4). [15]

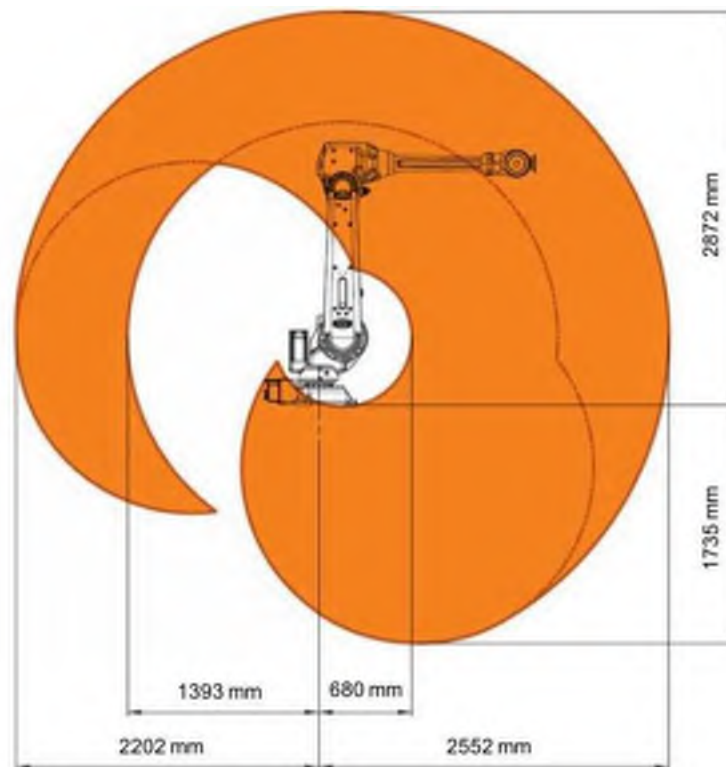


Figure 4: IRB 4600 working range (Source: [1])

All three robots have a gripper, which is especially designed for this kind of application. The middle one can change its tool to a welding gadget or a tying gadget. This means that this one has different types of jobs to do, compared to the others. The short rebars are moved only by the two robots with the grippers. This saves time for the middle one because it can keep the welding-gadget and a change of its tools is not necessary.

Developing the tools, especially the grippers, of the robots was also a student's project. The robots are carrying different types of gadgets. Based on the bending of the rebars, while they are lifted, the steel parts need to glide through the grippers of at least two machines. That's the reason for creating different shapes of gripper jaws. Figure 12 shows the one which does not let the bar slip through.



Figure 5: ABB IRB 4600 (Source: [16])

4.2.4 Description of the bending machine

The bending machine consists of several coils of steel. They are rolled out and cut at the needed length. If necessary, this machine also forms the rebars. Depending on the currently required bar, this machine provides the correct one in shape and length.

Designing a fixture for the bending machine, where the reinforcing bars are ready to get picked by the robots, was another subproject. It includes choosing a suitable bending machine, which meets the requirements best. Moreover, it needs to have a defined position for every single rebar. It must not be necessary that the robots measure the bar's position, when gripped.

The bending machine for this gantry must be strong and flexible enough to deal with different diameters and lengths. A minimum of six different reinforcing bars must be handled by this machinery.

4.3 Impact of automating the system

Building rebar cages is not the most favorite job for construction employees. The conditions for working on such a casing are not the best. One person is able to process 100kg steel per hour. This means that 40 workers are necessary to have the same result as three robots can produce in the same time. This means that the automatic production system will help to save a lot of money. This means that there is a lot of potential for spending the money on other things than on this high number of workers, which are still necessary.

The robots are able to work autonomously, without having someone standing beside the gantry and taking care of the production. This means that those automatic machines work on their own. There is no need of a “watchdog”. Nevertheless, trainings are necessary to learn how the whole machine works and what to do in case of an error. The rest will be done automatically.

5 Detailed description of the automated gantry

This chapter should give an overview of how the rebar cage is built and the whole gantry itself works in general. Step by step all the important parts of the system will be explained. Furthermore, pictures are used, which should help to get a better understanding of the project. This cage, which is shown on the figures, has been designed by Robotdalen. It is randomly chosen because it is only needed to be able to produce program code for the robots. This will be adapted afterwards. It is about twelve meters long and approximately four meters wide. The first step was to generate a rebar cage for some simulations, which can be shown to SKANSKA and used for the first test period. Afterwards, it needs to be adapted to be able to create any cage that is needed for the construction.

The gantry consists of four pillars, connected with two girders. Both of those two main girders have a rail, where three further struts can slide over. Every of them carries a robot, which can move sideways, as well as up and down. The combination of all those girders and struts lets the 6-axis robots move all around the workspace.

The spot, where the rebar cage is built, is on the floor, in the middle of the whole gantry, marked as a white rectangle. As already mentioned, all three robots have a gripper for manipulating the rebars. One of them has two welding tools additionally to connect the bars. It can carry only one at a time on its last axis. This means that this robot needs to exchange the gripper, if a welding tool is needed. The automatic machines are mounted next to each other. The machine, who has three tools, is the one in the middle.

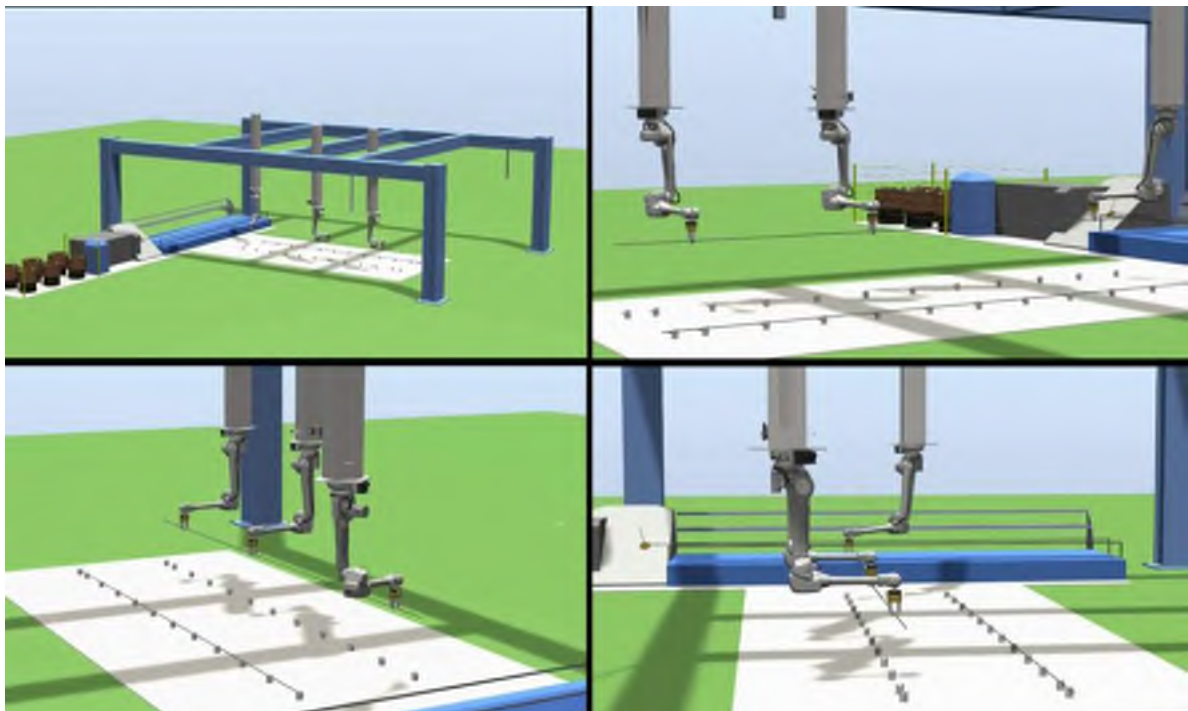


Figure 6: Screenshot after the first steps

In step number one, cylinders are set on the floor. Two parallel rows of them are needed because they are used as a safety spacer between the first rebar and the ground. This is necessary to have the whole cage not lying on the ground. Otherwise, the welding robot would have problems, connecting the rebars. Figure 6 shows the gantry after placing all the cylinders and the first rebar. The three robots are lifting the next one together. They put it right next to the other one, exactly on the second row of cylinders.

After one rebar is in position, the middle robot changes its tool from gripper to the tying gadget. Furthermore, it is connecting the rebar step by step with every single cylinder. Of course, both reinforcing bars are combined with the spacers by the robot. This guarantees that nothing is moving apart, while the whole cage is built afterwards.

The next step, after building a base, are rebars, which are formed like a “C” (see Figure 3). They are lying across the first two bars. Their shorter parts are pointing up. Between every spacer cylinder, seven of those C-rebars are placed. This means that 75 of them in total. Two robots need to hold it, while the third one is welding it to the straight rebars. For connecting two steel bars, the robot is using its welding pistol (see Figure 7)

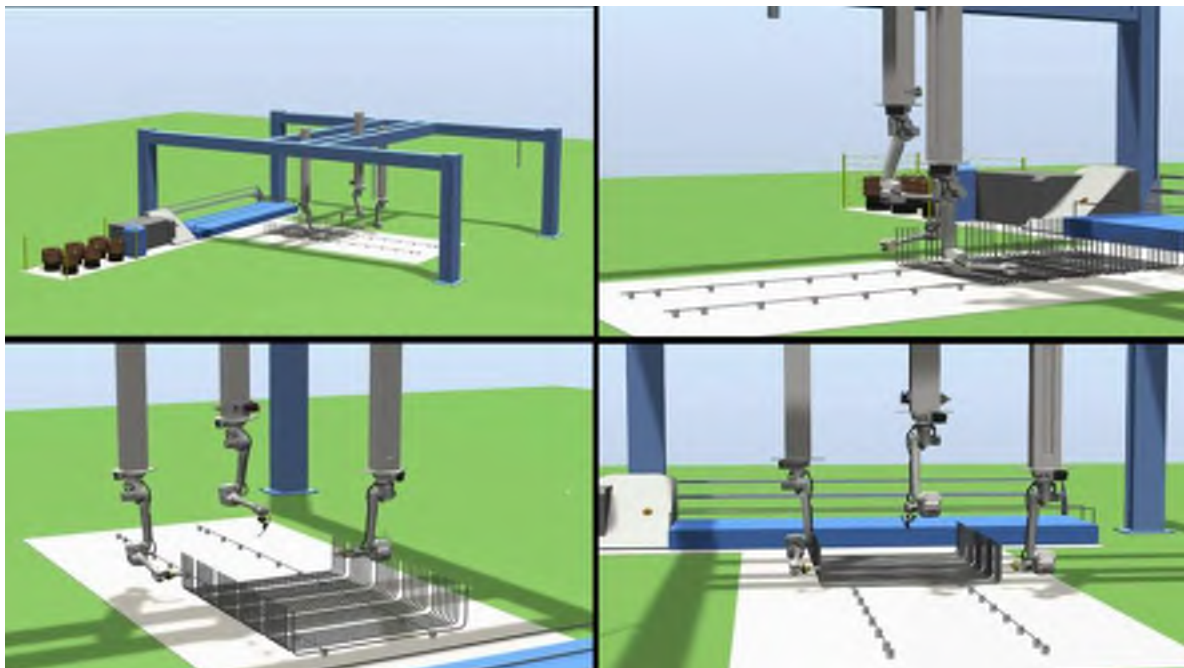


Figure 7: Screenshot while the second step

Step number three is the creation of a lattice on the bottom of the cage. This makes it more rigid and offers a bigger surface, which will get in contact with the concrete afterwards. Those rebars are as long as the first two ones. The distance between those “A”-bars is bigger than before at the “C”-reinforcing bars. Only fifteen on them are used this time.

After the grid is finished and all rebars are connected with the spot welder again, the shorter sides will be closed with rebars, which look like an “L”. This means, bars of type B are in use this time. They are short and light enough to be transported by only one robot. In addition, the second one is working with the tying gadget again. Next to all the straight reinforcing bars in step three, one of these steel parts is placed and fixed. They are mounted on both sides of the “A”-bars. Figure 8 shows the rebar cage while the last described steps.

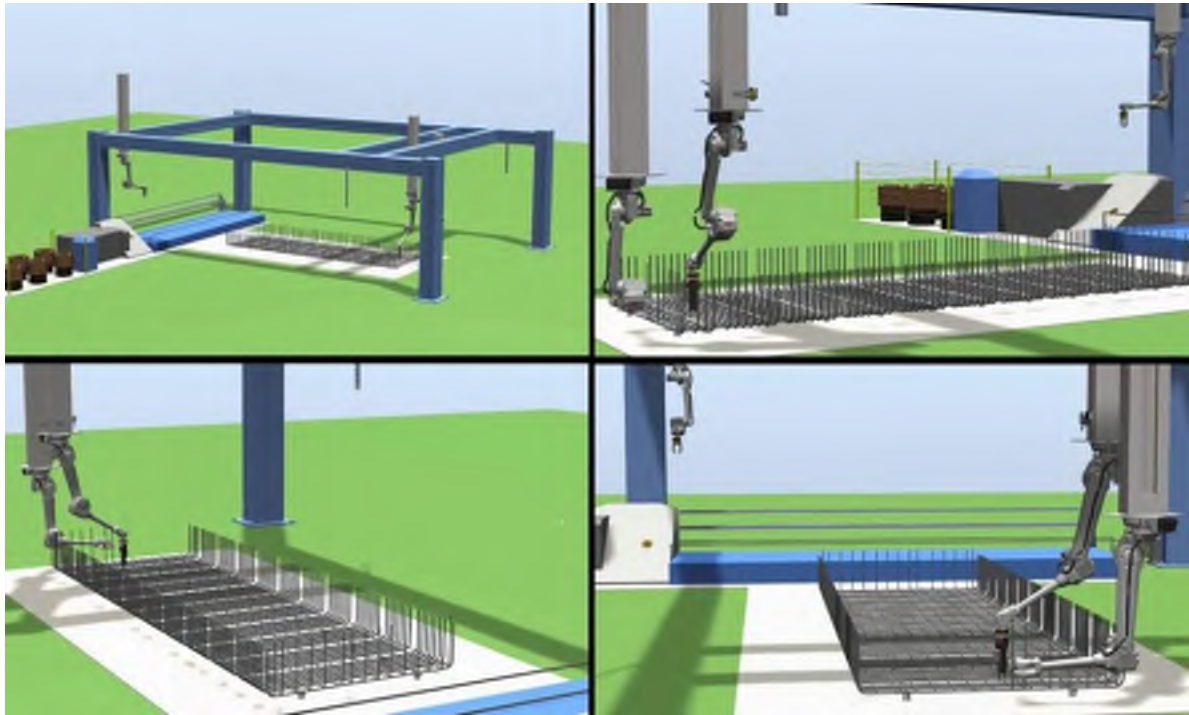


Figure 8: Screenshot while step four

The robots are moving a lot in this simulation. This means that much improvement can be done to lower the time, which is needed to build such a rebar cage. The middle robot, which has more than one gadget, exchanges the welding tools to the gripper after every single reinforcing bar is fixed. It even does this, if it is not carrying the new rebar afterwards. This means that this robot can keep for example the welding pistol for one whole step because it is not necessary to lift a rebar.

The walls of this cage will get more strength with additional rebars in the next step. Therefore, bars in three different heights are fixed. The longer sides do not consist of one single rebar now, but two, which are about have the length. On the smaller side, type C reinforcing bars are used. Some short rebars are added as well on the bottom of the cage, where bigger gaps have been left in step 3. Afterwards, further 12 meters long steel bars are added on the bottom too (see Figure 9). With every rebar, which is mounted in the cage, it gets more and more strength.

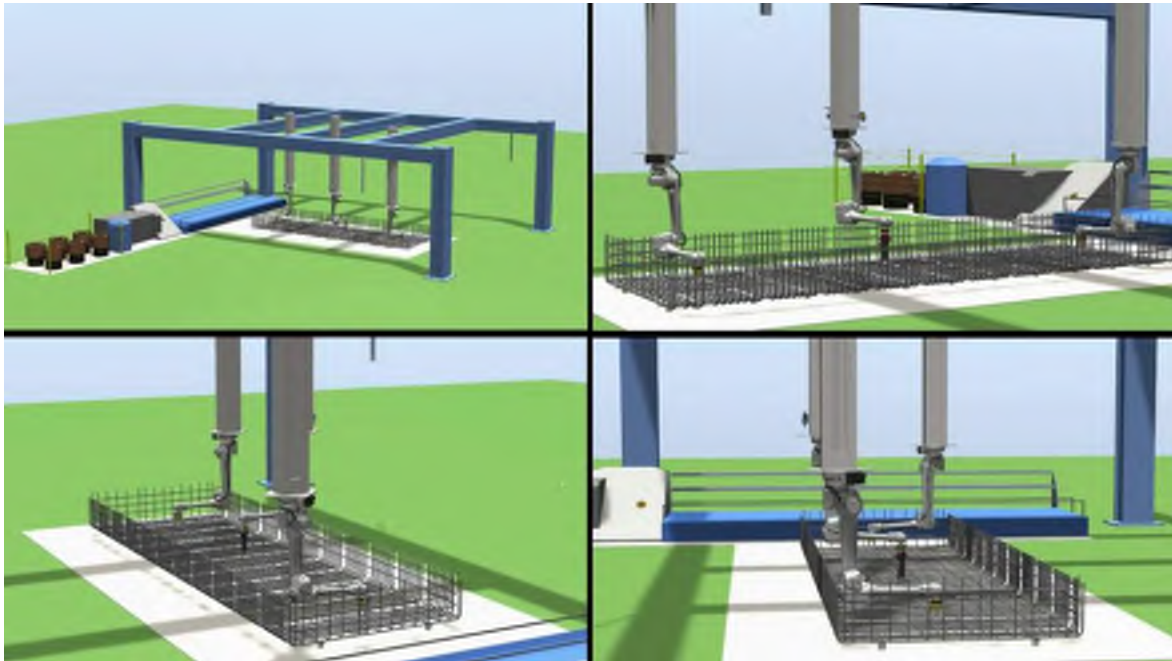


Figure 9: Screenshot while rebars are added on the bottom

The next step contains some rebars of type D. They are necessary to prevent bars, which are fixed on top of them from slacking too much. Two rows are enough to give them more support. Some rebars are mounted along the shorter side of the cage. Afterwards, the cage is closed from above with type B bars (see Figure 10). The middle robot uses the tying gadget again this time.

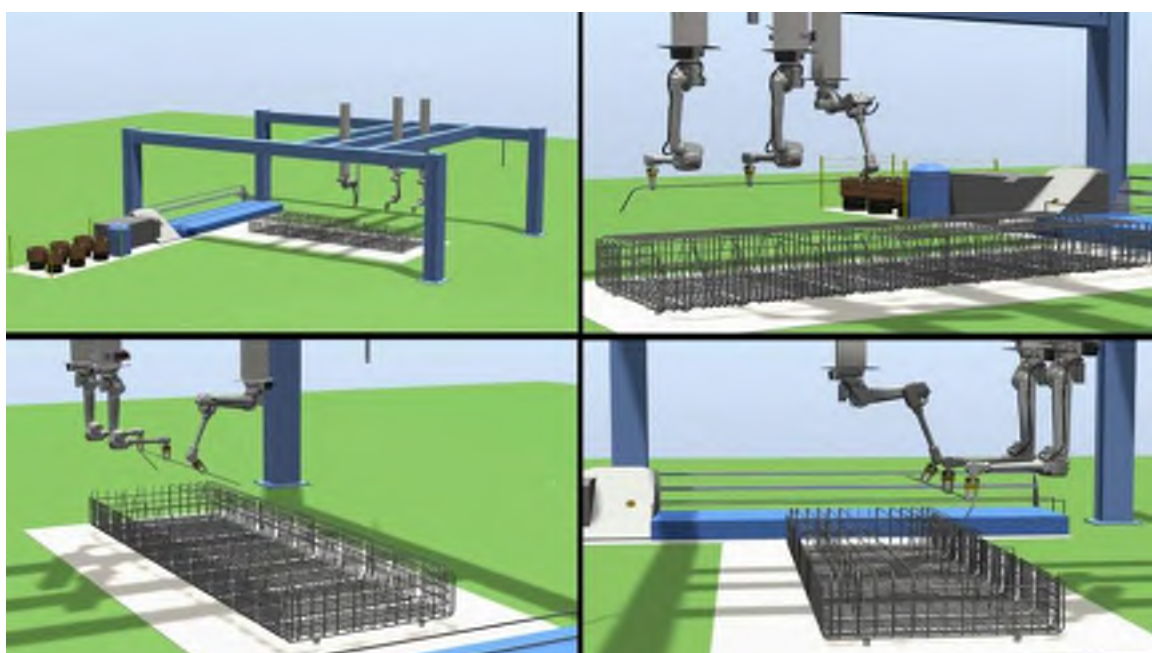


Figure 10: Screenshot while adding type B rebars

The basement of the column is finished after this step. The next part creates a cage for the pillar itself. Type C rebars, which look more like a “U” than a “C” are used this time. They are about three meters high. Additionally, some shorter reinforcing bars are enclosed to make the grid of the cage and therefore the distance between the single bars tighter. This leads to more strength of the hole casing, which will be filled with concrete afterwards. Lots of reinforcing bars are used in this step, which makes it the biggest one with the most time required. Figure 11 shows the almost finished rebar cage. It represents the basement and lowest part of a big pillar. A crane will lift it up, when it is ready to be placed on its final position.

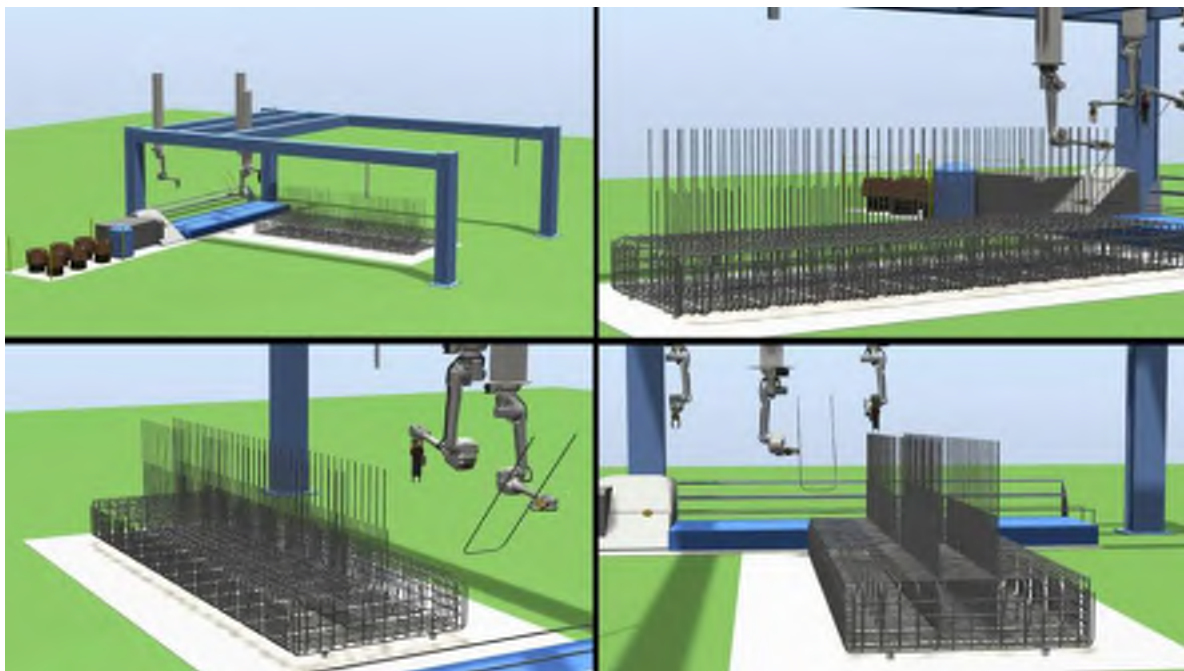


Figure 11: Screenshot of the almost finished rebar cage

As already mentioned above, this simulation contains of many opportunities for improvements. The robots are moving unnecessarily much, which increases the time needed to build a rebar cage like this. The middle robot changes its welding tool and the tying gadget back to the gripper after every single step without using it. Afterwards, it has to exchange them again to be able to connect the next rebars.

When rotating the rebars around the z-axis, the robots are moving step by step. They are lifting up, then they stop to rotate the bars, if necessary. After the correct angle is reached, the robots are moving the bar horizontally. After it is placed, one or two robots are holding the bars, while the middle machine is welding and fixing it to the others.

The bending machine is only partly animated in this simulation in RobotStudio. This means that the rebar gets unrolled from the steel coil and afterwards cut, when its needed length is

reached. It is not showed, how the rebars reach their final position, where the robots are picking them up. For that reason, this part must be added in the future.

This simulation shows a freely selected rebar cage. It is just one possible casing that can be built by robots. Moreover, the machines must be programmed flexible in the future. They need to be able to build other casings on their own as well. It is necessary that the gantry can create rebar cages with different forms and sizes.

6 Additional sub-projects for this automatic system

As already mentioned, this thesis is about one out of four sub-projects. The others will be explained shortly in this chapter. Those developments were done by students from Mälardalens University in Eskilstuna. They were all working on their bachelor thesis.

6.1 Miniature model

To get a better understanding of this gantry, a miniature model should help SKANSKA's management first of all to have a smaller version, existing in real life. In addition, this causes a much better impression about the whole project. It is much easier to imagine the unscaled version, with this miniature model.

Everything needs to be adapted to a scaled-down gantry, which should work like the real one. This means that instead of the ABB IRB 4600, some smaller robots are used. Also the rebars need to be dimensioned smaller in length and width. It is necessary to not understand the word miniature model wrong in this case. It does not mean a version, which can be built up in a classroom. It is still several meters long and wide. But compared to the final version, it is still smaller of course.

The first tests should be done with the miniature model. It should help to discover first mistakes and to be aware of problematic or even impossible ideas. The designed tools can be tested as well. If anything does not work properly as wished, it is easier to make necessary changes and have some tests afterwards again.

6.2 Robots' tools

As already mentioned several times, two of the robots have just one tool – a gripper. The third and middle one has one welding tool and a tying gadget additionally. This one is able to exchange its gadgets whenever it is possible to build the rebar cage. The other tools, which are not needed at the moment, are fixed on the pillar, where the robot is mounted on.

6.2.1 Gripper

For this project, it was necessary to have different grippers on the three robots. The reason for that is the dynamic movement of the rebars. They are slacking, if nothing is stabilizing them. Whenever this is happening, both ends of the reinforcing bars move closer together. This means that the robots would have to move with the rebars. According to that, they should be flexible enough to hold this steel piece on the one hand, but react on its movements on the other hand. To be aware of this complex task, the grippers are designed appropriately.

One of those grippers grabs the rebar really tight, so no movements are possible, so it is not slipping through. Two of the robots have a close grip, but do not reduce its movements. This

means that the reinforcing bars are actually carried loose by them, but of course prevent it from falling down.



Figure 12: Gripper with a fixed rebar

Figure 12 shows the gripper, holds the rebar tight. This tool is developed for the miniature model, which means that it needs to be adapted for the real gantry. As a result, it has to be bigger and stronger for the unscaled automatic machinery.

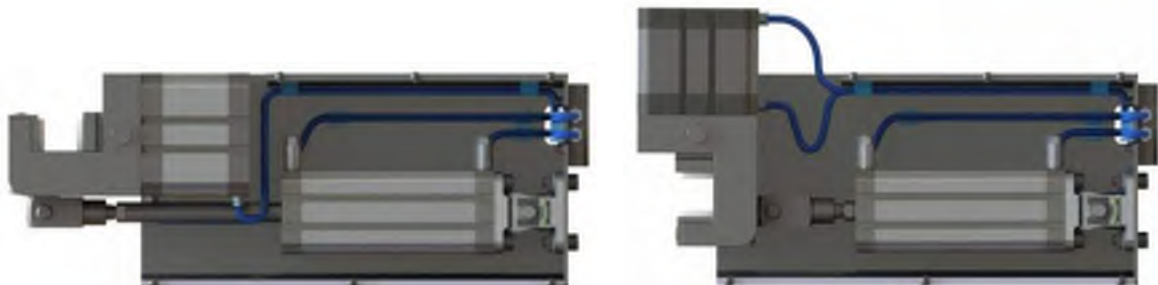


Figure 13: Gripper straight (left) and after rotation (right)

Figure 13 displays the gripper, which is holding the rebar completely tight. On the left side, it shows the tool, when it grabs the steel bar. The pliers close and fix the part. On the right side, the front part of the gripper is turned by 90°. This is necessary to be able to rotate the rebar. The gadget is cut open, so it is possible to see the pneumatic components. It does not consist of many parts. There is an engine for the gripping part itself, a pneumatic cylinder and some hoses.

There are no pictures of the grippers, which carry the rebars loose to be aware of their dynamic movements. It has not been part of the bachelor thesis of the Swedish student, working on this kind of tools. The gripper, which is shown above, is the more complicated one to develop. The requests on that are much higher because it is more difficult to realize

a tool like that. The gripper of the other two robots works like a ring around the rebar. The bar is lying inside of it and slides or turns completely free. Its only task is to carry the reinforcing bars, but not to have a really close and tight grip. There is no pressure on the bar from these tools.

6.2.2 Welding pistol

There was no need of developing a special welding tool for this project. Robots are used worldwide for welding applications. This offers a wide range of experiences. Furthermore, this means that there are many existing, well working tools already. For this gantry, the welding pistol does not need to have anything special. Lots of companies in the world, which are developing welding tools, offer already special parts for robots.

Probably the only specific thing that is important for this project, is the possibility to exchange the tools. According to this, there must be a system, which allows the robot to fix this gadget on its pillar without breaking anything. The hoses, which lead the necessary current and welding wire to the tool needs to be flexible enough to be able to give the robot its essential freedom for moving around.



Figure 14: ABB robot with welding pistol (Source: [8])

Figure 14 shows an ABB IRB 1520 ID, which has a welding pistol on its last axis. In this case, the tool is fixed and not exchangeable without unscrewing it from the flange. Nevertheless, it is one existing system, which basically could be used for this project.

6.2.3 Tying gadget

This tool is used to tie the rebars together with wires. Figure 15 shows a gadget, which is used by human workers of course. There will be a version, which has the same function, but has the possibility to mount it on a robots last axis. The rebar shall be introduced in the front, between those two jaws. When the blue trigger gets pulled, a wire gets wrapped around the reinforcing bar and tied together. The machine automatically cuts this wire, when the bars are connected properly.



Figure 15: Rebar tying machine by TLF tools (Source: [4])

6.3 Bending machine

The bending machine serves the rebars to the robots. Depending on which shape is required next, it creates the appropriate one. As already mentioned, four different types (see Figure 3) are available for building a rebar cage. The general working principal is quite easy. The rebars are rolled up on so called coils next to the bending machine. Depending on the cage that shall to be built, the suitable diameters have to be available. The highest diameter that is used in this project is 32 mm. It is not planned to have longer cages than 12 meters. The gantry's control sends the needed shape, length and diameter to the bending machine to have the correct reinforcing bar in use. After the machine gets the information about the form of rebar, the machine unrolls the steel bar with the appropriate diameter. It gets bended either once, twice or not at all. Moreover, the machine also straightens it to not have curved shapes anymore. Figure 16 shows a bending machine, which pulls the rebars from the coils into the bending part. The bars get straightened and bended inside. It is not decided, which bender will be used for this gantry, but the function is basically the same.



Figure 16: Bending machine by TJK Machinery, Inc. (Source:[20])

The important part of this thesis, where two Swedish students were working on was the spot, where the ready rebar is positioned and waits to get gripped by the robots. This location needs to be defined and it shall be the same for every rebar. Otherwise, some sensors would be necessary to guarantee that they always are able to grab the reinforcing bars correctly. It is not planned to let the robots stop again and align the rebar. The grabbing spot shall always be exactly the same, so that the machines know where they have to place it in the cage afterwards. Therefore, a fixture had to be designed. The students had several concepts because they discovered some difficulties with choosing this fixed position, where the rebar is lying every single time after it was bended.



Figure 17: Function of bending machine (Source: [9])

Figure 17 shows how bending machines work in general. The principal is actually quite easy. The rebar gets introduced from one side. The black disc on the table is turning, when the bar is inserted wide enough. The block on the outside of the rebar affects some force on the

steel part and bends it while turning around. Consequently, the rebar shall be pushed into the machine while bending to ensure that the diameter stays the same and it does not lose any thickness.

7 General information of game physics

Physics is a discipline with hundreds of years of research and calculations. This should not be mixed up with a game physics. They do not have much in common because there is still a big difference between those fields. A game physics makes use of the classical mechanics themselves: Those laws, which govern for example, how objects behave and especially move under the influence of gravity or other forces. In academic physics these laws have been replaced by new theories like relativity and quantum mechanics. However, in games they give objects the feel of having a mass, inertia, buoyancy, bounce or simple being solid. Game physics is used since the first games have been developed. Therefore, they are necessary to realize most realistic movements of particles like: fireworks, sparks, smoke, explosions or the ballistics of a bullet. Those simulations have been used for flight simulators as well as for about three decades. Afterwards, car physics became more important. Their sophistication of tire, engine models or suspension was increasing more and more. After processing power became available easier and cheaper. Consequently, taking much more calculations at the same time became possible. Suddenly, things that never have been seen before, become real. For example, crates could be moved and stacked and walls could be destroyed. The rigid body physics started including soft bodies, to be able to simulate textiles like ropes, flags or clothes [12].

In the description for this project, using a physics engine was planned. It is not easy to find physics engines, which can be used for own projects. It is much more common to use game engines. They are more developed and offer more possibilities. This means that in this project, a game engine was used. Nevertheless, this work contains the term physics instead of game engine. This chapter will explain the types of engines, different brands and criteria, how and why an engine was chosen.

When talking about computers, an engine is basically a construct, which causes timed preemption. This means that it is interrupting a task temporarily and resuming after some time. In addition, this is also called context switch. Engines also can consist of other engines, they become so called “nesters”. Furthermore, they are responsible for calculations and simulations. Usually they are running independently in the background without being influenced by the user’s interface.

7.1 Description of physics engines

Game physics are used for more than thirty years now, but there has been a change in the way, games are programmed in recent years. In general, everything that appears in the game had its own program code, which made it really laborious on the one side, but the object was perfect on the other side. Its trajectory was programmed especially for this kind of use. This takes too much time to develop code for every single object that appears in a

game. If the simulation is simple and the expenditure of time is small enough, it is still done like that. Nevertheless, in most of the games nowadays, the complexity increases too much and it is not possible to work like this anymore.

If an arrow is needed in a game, the arrow will be programmed perfectly and the ballistics will look almost real. But what if this game also contains bullets? Those two projectiles have a similar behavior like arrows do. But the programmer has to develop new code for its ballistics. If the same code has to cope with arrows and bullets for example, the software abstracts away from particular projectiles and simulates the general physics that they all have in common. This is how a physics engine works: A common piece of program that knows about physics in general, but is not programmed with the specifics of each game's scenario [12].

Of course, only the physics behavior is not enough to be able to simulate an arrow or a bullet. It is also necessary to program the characteristics of those objects. The code needs to contain the physical properties.

A physics engine is used to show physical behaviors of processes or to calculate object's properties. This is mostly used as a part of a game engine. Moreover, they appear in computer games as well as in simulation software. Based on this reason, it is much more important to run them in real-time than having a lot of details. For this project, it is not important to know, what the engine exactly looks like, but how it is working, how it can be adapted and how it is used in the best possible way.

Advantages of a physics engine

First of all, the most important reason for using a physics engine is save time. Game programmers usually intend to produce more than one game with some physics effects. If they developed it once, they would usually use it every time afterwards. Furthermore, it immediately pays off, if they can just import and maybe adapt their physics engine to their new project.

Another advantage is the quality. When a physics engine is used more often, it probably gets improved every time. Developing new ideas for new games help to correct some errors. However, also the quality of the game is much better with a physics engine. If it is possible to simulate a cloak and water, it will not look realistic, if the cape behaves in the water as if it gets blown by the wind. Therefore, it is not easy to produce a physics engine, which is able to simulate physics behaviors in water and wind. Nevertheless, is it simpler to combine those existing physics engines than creating separate ad hoc code programs for those ballistics. It would make the game look much more realistic, if they are combined in all situations. Having them working together, opens much more possibilities. [12]

Collision detection system

The most important purpose of using a collision detection system is to determine, whether any objects have come into contact with the environment. To find an answer to this question, every object is represented by one or more geometric shapes. They are usually very simple, like capsules, boxes or spheres. More complex forms are possible as well, but they normally need more time for calculations. The collision detection systems are testing all the time, whether one or even more objects came into intersection with the surrounding or maybe each other.

Such systems do not only answer *yes* or *no*, in case of any touches. They consist of information about the nature of those contacts. Consequently, this avoids unnatural simulations of the physics engine. Collision can provide support for an object. This means that some contacts together allow an object to rest. An example for that is any force, like gravity, acting on a shape. [13]

Weaknesses of a physics engine

There are reasons, which prevent someone from using a full physics engine. First of all, one of them is the factor speed. A physics engine usually needs intensive processing performance. Moreover, it is a general simulation tool, which can be used for almost every object. It cannot turn off unused parts and adapt to the actual needed ballistics. This means that the whole engine is working all the time. The smaller the game environment, the bigger the waste of processing power because only a short part is really needed. This is not really an issue for personal computers because their processor unit is big and fast enough to handle the full engine for a game. However, it can slow down games on mobile devices like phones. A game, where water is simulated can run faster on a phone, if a special water physic engine is Than the same game on a computer with a general engine running.

After all, it can increase the time, which is needed for programming the game, if a special physics engine is used. Sometimes they need very specific data of the simulated objects to be able to show them realistically. This means that the programmer has much more work to do with adding all the necessary information to the engine. Sometimes it is easier to use a normal physics engine and additionally develop a tool for specific simulations for a game, which does not need that much data.

7.2 Description of game engines

A game engine is a much bigger construct than a physics engine. In addition, it offers much more possibilities. Nowadays, programmers are able to license their game engines and reuse the most important parts of their software to create new games. This practice still involves considerable investments in custom software engineering. Nevertheless, it is much more effective than generating all the core engine components in-house.

There is no studio, which makes a difference between the game and the engine. Moreover, it is understandable, considering that the definition of those two components shift as the game's design solidities. [13]

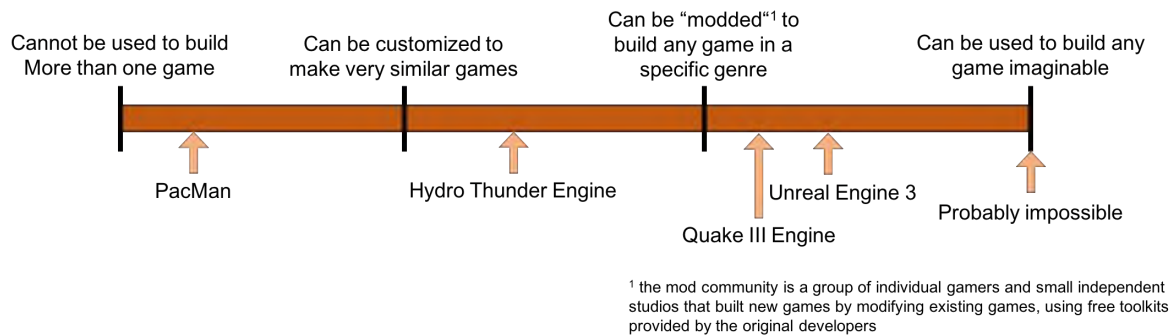


Figure 18: Game engine reusability ([13])

Figure 18 displays the reusability of game engines. In the row below the beam, some game engines are mentioned. The further to the right side they are, the higher is their possibility of using it again for developing new games.

7.3 Types of physics engines

As already mentioned, there are different types of physics engines. They can be divided by their functioning like:

- rigid body dynamics
- soft body dynamics – not elastic deformed bodies (e.g. clothes)
- spring dynamics – used for ropes
- fluid dynamics – simulation of liquids or fire

Depending on the simulated world, the appropriate physics engine should be chosen. Usually an engine includes more than one of those types, to be more flexible and to have more possibilities in usage. Nevertheless, it has to be decided in advance, which physics engine fits the most to the project's requirements.

Rigid body dynamics engine

For simulating a rigid body, a time-continuous and discrete object is modeled. Rigid bodies consist of particles, which are inflexible connected to each other. These conditions are described with:

- Position (of the center of gravity)
- Orientation
- Momentum

- Angular momentum

Soft body dynamics engine

As the name of this kind of dynamic simulation already shows, bodies are used, which are flexible and can change their forms. Deformable objects, such as textile clothes, are typical examples for the usage of soft body dynamics.

Spring dynamics engine

This engine type is actually quite similar to the previous one. In addition, some sources count the spring dynamics engine only as a subgroup of soft body dynamic engine. The difference between those two is therefore not defined because the border is fluently. Examples for this one are, as already mentioned: ropes.

Fluid dynamics engine

First of all, an engine, which definitely distinguished from the other three, is the fluid dynamics engine. Like its name already tells, this one is used for liquid materials. Either some fluids or gases are simulated with this type of physics engine. A high amount of single particles is combined to one fluid body. The difference to the rigid body is that they can be separated easier, like water drops in real-life.

7.4 Different game engines

All things considered, physics engines are usually used for simulations and computer games, the number of providers for those programs is quite high. Moreover, this offers more possibilities for the game engineers, while developing new stuff. Besides that, it creates more options for simulation software. In this chapter some important physics engines are described more detailed.

Bullet Physics

Bullet Physics is a collision detection and physics library used by both, the game and the film industry. The collision system is either included into its dynamic simulation, or can be used as a standalone. For that reason, books are provided to be able to use it in both ways. Bullet physics is supporting continuous collision detection (CCD). Therefore, this is extremely useful, if small and fast moving objects are used in the simulation. [13] Bullet's collision detection is high developed. The number of available constraints of objects is high in this engine. In addition, it is used to simulate rigid-bodies and non-elastic forms that can be deformed. [6]

Open Dynamics Engine (ODE)

The name of this physics engine implies that it is open source and therefore free to use. This physics engine is quite similar to bullet with the difference that the visualization is already integrated and therefore much easier for the programmer to use. Another difference is that it cannot be used for soft bodies. Consequently, it can calculate collisions and rigid objects. Another big plus for this engine is that the full source code is available, which makes programming much easier. In general, this opens the possibility of modifying and adapting it for specific needs. [17]

Havok Physics

Havok Physics is not really open source, but shareware. This means that it is possible to try the software and after a defined amount of days, the user has to register his license at the author. Consequently, it is actually a commercial product, and especially the most expensive engine solution. Havok provides one of the richest feature sets available. Its developers are boasting the excellent performance characteristics on all supported platforms. [13] Furthermore, this product contains of a physics engine, including a collision part, but also a number of optional add-ons. A vehicle physics engine, a fully animated software development kit (SDK) and a system for destructible objects are parts of Havok Physics as well. It is running on lots of different platforms and also optimized for them. Examples for those systems are Sony PlayStation 4, Microsoft XBOX ONE, Wii and on PC of course. This engine can be programmed in C#. [11]

PhysX

PhysX started as a library called Novodex, developed by Ageia to market their dedicated physics coprocessor. Later it was bought by NVIDIA and changed to run using their graphics processing unit (GPU) as a coprocessor. [13] This engine outsources calculations for physical effects to the graphics card to not reduce the central processing unit's (CPU) performance. This lets the whole computer itself operate very fast. This engine can only be programmed in C and cannot be used with Mac OS X. After all, it was provided entirely for free and with paying a fee, programmers could get access to the full source code and the ability to customize the library as needed. Now it is only commercially available.

Box2D

Another open source physics engine is Box2D, which is written in C++. It can be used for free and for simulations of rigid bodies. This engine can be used with some different programming languages like Java or C#. According to this, there are bindings existing, which compile libraries from Python as well. [5]

7.5 Criteria for choosing a game engine

Before the practical part of this project can be started, one of the available physics engines has to be chosen. Therefore, the most important criteria have to be determined. After collecting information about every single engine, which could be probably used in this work, the most fitting one can be evaluated. Table 2 shows the most crucial factors, which helped to get the best physics engine for this project.

Name	License	Type	Operating system	Language	Plug-ins
Bullet	open source	rigid & soft body	Windows, Linux, Mac OS X	C/C++	Houdini, Blender
ODE	open source	rigid body	Windows, Linux, Mac OS X	C/C++	DrawStuff
Havok Physics	shareware	rigid body	Windows, Mac OS X	C++, C#	-
PhysX	commercial	rigid & soft body, fluid	Windows, Linux	C	-
Box2D	open source	rigid body	Windows, Linux, Mac OS X	Java, C#, Python	-

Table 2: Criteria for choosing a physics engine

7.6 Choosing physics engines

ABB's simulation software RobotStudio only runs on Windows, therefore a physics engine, which runs on the same operating system as well, was required. This was not the problem, as table 1 shows. All of the chosen engines can be used for rigid bodies, which is important for this project. Furthermore, it is preferred to use open source software, which left Bullet, Box2D and Open Dynamics Engine to choose. In the study Mechatronics/Robotics, neither C# nor Java, nor Python are taught. For that reason, Box2D has not been used. Only two of the five possible physics engines were left.

In the beginning, Bullet has been used because it can be used additionally for soft bodies. This would extend the possibilities, if necessary. Using the Bullet engine is quite complex because it consists of several sub programs, which are used for creating and moving parts. A few samples were found online, but did not work, which made using this engine more

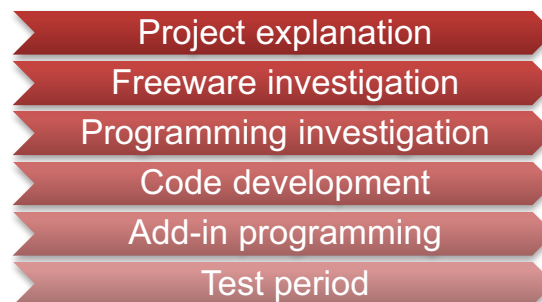
difficult. After receiving the information that Bullet Physics is probably too inaccurate for this kind of problem, ODE was used instead.

8 Method and synthesis

This chapter should explain the whole working process for this project. From the beginning to the end of the test period, the single steps are mentioned. Furthermore, the ways of obtaining information about rebars and physics engines is described shortly. The third and last point of this part is the product development. Consequently, risk analysis was made to evaluate the possibility of finishing this project positively.

8.1 Process of development

This project was of course divided into several steps. From the beginning to the test period, it consisted of six main parts in total. This helps to follow a line and work more structured. Having a chart, which shows your current state and the following steps, prevents of losing the track too easy. The chart below shows the most important aspects of this project, which have been worked off. The last period, where the product gets tested is usually the biggest one. This is the most important part because it shows, if the results are finished or need to be revised.



Project explanation

First of all, it was important to get a detailed description of the project. Moreover, it was necessary to understand what it is about. Also its impact on the future of building rebar cages should be included in the project plan. Programmers, working at Robotdalen on this project, were giving an introduction to this thesis in the beginning. Some questions could have been answered as well. In conclusion, the kick-off meeting was the most important one because it was the first time that some more information about the project was given.

Freeware investigation

Based on financial reasons, SKANSKA's request was to use a freeware physics engine. Therefore, useful programs were found and a suitable one chosen, to work with. If no free provided code was found, which is suitable for this project, SKANSKA would have paid for a

commercial version of physics engine of course. However, they were aiming for saving money on that area.

Programming investigation

As already mentioned, programming a physics engine and an add-in for RobotStudio is nothing, that is taught in mechatronics/robotics. This means that it was necessary to gather information about producing working program code for this project. This investigation includes the search for existing engines that could have been used. Besides that, data about developing own code files has been collected.

Code development

Generating code, which is operating correctly is not always easy. Especially, if the surroundings are new. Nevertheless, coding the rebar's dynamic behaviors was the main part of this project. Visual Studio has been used to run existing programs and developing new parts.

Add-in programming

Influencing the robot's behaviors in RobotStudio was a request from SKANSKA. Furthermore, it should help to understand, how the reinforcing bars react in case of speed changes for example. Therefore, an add-in for RobotStudio should be produced, which offers the user possibilities to turn the physics engine on and off or change parameters.

Test period

Program code always needs to be tested. This is usually done quite often after small changes. Entering parameters or other data should work as well. An additionally and common method of testing code is to enter wrong inputs on purpose. In conclusion, the program must not fail, but handle the errors and inform the user about any mistakes.

8.2 Elicitation of data

Getting information about the main project itself, before starting to program was important. Obviously, it is necessary to get a feeling, what the sub-project's role is, to produce something that fits into the "master plan" in the end. Working with a physics engine is usually done by game engineers. It is not part of the curriculum in mechatronics/robotics. For that reason, it was a necessity to find information about this quite important part of this sub-project.

Conversations with colleagues

Much information about working with rebars came from people, working at SKANSKA. They have the experience and knowledge about rebar's behaviors. Mr. Patrik Groth is working for SKANSKA and responsible for this project. He shared his knowledge about building rebar cages.

Most of the information that was used to program the physics engine and the add-in came from Erik Hellström, who is responsible for projects with industrial robots at Robotdalen. He has already developed a high number of routines for ABB RobotStudio. Unfortunately, he has never worked with a physics engine before. Consequently, he had no experiences to talk about on that field.

Meetings every two weeks helped to stay updated with the other sub-project. Some difficulties could be solved as a team, if the others had a better background or maybe just an idea, which helped to get further.

Literature from the library

There is no existing study program at Mälardalens Högskola, which uses physics engines. Based on that reason, the library at this University does not have literature about this subject of programming. Therefore, this made it harder to gain knowledge about developing code for this project.

Research on the internet

Based on the fact that nobody at Robotdalen had ever worked with a physics engine and MDH's library did not have any books about this field, the main research was done online. Unfortunately, it is not well documented. Moreover, it is a very specific area of programming, which means that it is not common to use physics engines that often as a programmer. All things considered, this made it hard to find information online as well. Not even the manuals of the physics engines provided many details for getting started.

Usage of online platforms

ABB has its own developer platform (<http://developercenter.robotstudio.com>), which provides some "How-To manuals" to get started. This webpage also consists of a development guide and some code examples, which can be compiled and adapted for own programs.

Besides that, ABB also offers a forum for RobotStudio (<https://forums.robotstudio.com>). Like on every forum, it is possible to post or answer questions from other users. Something special about this forum is that professional help from people, working for ABB is provided. There are employees, working with RobotStudio, who are specialists, answering questions, if someone has difficulties, getting further.

8.3 Product development method

This chapter will explain the steps, which are made to produce the program for this project. Not every single part will be told in detail, but the overall method is mentioned. A work like that, which needs to be planned seriously, consists of many necessary steps to generate a working product.

Definition of research questions

A master thesis usually throws up some questions about its impact on the future for example. Defining some research questions can help to keep on track. They define for example reasons for this work and why it is necessary to research in this field. It helps to identify the thesis' impact on a specific, scientific area.

In this master thesis, the following research questions have been defined:

- What will the knowledge about the rebar's behavior be used for?
- Could SKANSKA also work without having a physics engine included?
- Is it possible to improve the system with the program out of this work?

Concept generation

A concept is an undetailed and temporary idea. It can be a meta model or a draft, which shows the view on a higher leveled or preliminary plan. A concept probably leads to positive results. It can or sometimes shall be adapted, if the original idea seems to fail. For this thesis, a concept has been developed in cooperation with people from SKANSKA and Robotdalen. They knew about the demands, which were necessary for this project. According to this, it was helpful to not forget anything on the one hand and also to not add unnecessary stuff to the program on the other hand.

Risk analysis

According to the economic consideration in Table 3, a positive realization of this project seems to be almost impossible. Moreover, there are lots of difficulties, which are categorized as very critical. Another three packages are even most critical. It is essentially to be aware of those work packages and their influence on finishing this project. Keeping an eye on them is absolutely necessary.

Based on the fact that there are quite a lot of factors, which may let the project fail, it might happen that a positive success is impossible. In that case, adapting the goals for this project may become a necessity.

Work package	Possible deviation	Consequences of deviation	Probability	Severity	Possibility of exposure	RPN*
Physics Engine	Missing knowledge in programming	Finishing programming impossible	8	8	8	512
Programming language	Necessary to use a “new” language	Loss of time because of getting into new language	7	6	5	210
Robot Studio	Unable to include physics engine	Finding a way to communicate between RS and PE	7	7	6	294
Communication	Problems with sending/receiving data between two different programming languages	Impossible to communicate	6	7	6	252
Time	Too little time planned	Extend the internship	8	5	8	320
Spoken language	Explaining problems in Swedish/English	Communication problems between languages	2	6	3	36
Support	Too little online/offline support	Too little help to get further	7	8	7	392
Calculations	Too complex problems	Computational calculations necessary	6	5	8	240

Table 3: Economical consideration (Risk analysis)

* RPN = Risk priority number

9 Practical realization

This chapter contains everything that was done practically for this project. The first phase – looking for literature or general information about physics engines – took quite a lot of time. Nevertheless, it is not easy to find data about this topic online, even though physics engines are used in every game or simulation software. Therefore, it needed some time to get into that matter. As already mentioned, not even the programmers at Robotdalen have ever worked with a physics engine before. They never needed an engine for their previous projects yet.

To get a feeling of the rebar's behavior, while it is grabbed by the robots, some analytical calculations have been made. After all, this helped to know, what it should look like, if only gravity is acting. Afterwards, this bending was tried to be realized on the computer. The deformed rebar should appear in the simulation software as calculated.

9.1 Analytical calculations

Some calculations were done, before programming the physics engine could be started. Getting a feeling for the behavior of those rebars was necessary. This made it possible to know, what the results should look like. The bending of the reinforcing bars was the most interesting thing in that case. In the calculations below, the rebar is grabbed by two robots. It is not common that the rebar is carried like that, but it shows a case with an extreme slack. This is usable for the collision detection.

9.1.1 Conditions for the calculations

Parameter	Symbol	Value	Value in SI
Elastic modulus	E	200 GPa [10]	$2 \cdot 10^{11}$ Pa
Density	ρ	7.85 kg/dm ³ [10]	7850 kg/m ³
Diameter	d	25 mm	0.025 m
Length	a	12,000 mm	12 m
Gravity	g	9.81 m/s ²	9.81 m/s ²

Table 4: Parameters for the calculations

First of all, it is important to decide about some conditions before calculations can be made. Therefore, materials, dimensions and surrounding had to be determined first. Table 4 shows the used parameters. The material of the rebars is structural steel. The maximum reinforcing bar is about 12 meters long. This was also used here to have the biggest possible deflection. The maximum diameter is actually 32 mm. Choosing this length makes the reinforcing bar stiffer. This means that the slack decreases. To find out a bigger deformation, the next smaller size, 25 mm, was selected. Another important aspect is that only the static calculations have been made. For the first programming steps, it is enough to work statically. Therefore, the bending of a straight rebar was found out. Further it had to be decided, how the rebar is fixed. In this case, it was assumed that two robots hold the reinforcing bar on its ends. There is no external force, which would influence the straight bar additionally.

9.1.2 Description of the calculations

The area of the rebar's cross section was calculated with following formula:

$$A = \frac{d^2 * \pi}{4} \quad \dots \quad (\text{Area of a circle}) \quad (1)$$

$$A = \frac{(0.025\text{m})^2 * \pi}{4}$$

$$A = 490.874 * 10^{-6} \text{ m}^2$$

The area of the cross section is necessary to be able to calculate the volume of the rebar, with its length of 12 meters.

$$V = A * a \quad \dots \quad (\text{Volume of a cylinder}) \quad (2)$$

$$V = 490.874 * 10^{-6} \text{ m}^2 * 12 \text{ m}$$

$$V = 5.890 * 10^{-3} \text{ m}^3$$

Furthermore, the volume was used to get the mass of the whole reinforcing bar.

$$M = \rho * V \quad \dots \quad (\text{Volume of a cylinder}) \quad (3)$$

$$m = 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 5.890 * 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$m = 46.24 \text{ kg}$$

The mass is depending on the material, the density and the volume of structural steel. A 12 meters long rebar weighs about 46 kg in total. The moment of inertia is necessary to be able to get the deflection of the reinforcing bar afterwards. Therefore, it is important to choose the correct one for a circle in this case. The moment of inertia is calculated with the radius

to the power of four multiplied with π and then divided by four. With entering the diameter instead of the radius, following equation arises:

$$I = \frac{d^4 * \pi}{64} \quad \dots \quad (\text{Moment of inertia of a circle}) \quad (4)$$

$$I = \frac{(0.025 \text{ m})^4 * \pi}{64}$$

$$I = 1.91748 * 10^{-8} \text{ m}^4$$

F_G is the force, which results from multiplying the bar's weight m and the gravity g .

$$F_G = m * g \quad \dots \quad (\text{Moment of inertia of a circle}) \quad (5)$$

$$F_G = 46.24 \text{ kg} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F_G = 453.617 \text{ N}$$

The rebar's dead load results in approximately 450 N. The final step is to calculate the deflection. As already mentioned, there is no external stress acting on the bar. The only force that is included in this formula is the rebar's dead load. This reduced the expense for those calculations a lot.

$$W = \frac{5 * F_G * a^3}{384 * E * I} \quad \dots \quad (\text{Deflection of an object under its dead load}) \quad (6)$$

$$w = \frac{5 * 453.617 \text{ N} * (12 \text{ m})^3}{384 * 2 * 10^{11} \frac{\text{N}}{\text{m}^2} * 19,174.760 \text{ mm}^4}$$

$$w = 2.661 \text{ m}$$

9.1.3 Results of the calculations

First of all, there are only a few equations necessary to get the rebar's behavior, when hanging on two points on its ends. The result of the calculations tells that the rebar is slacking for about 2.7 meters. This tells the programmer that it is absolutely necessary to use all three robots to carry the reinforcing bars with a length of 12 meters. Even if it is 10 meters long, two of the machines are not enough because the bending is too much. The calculations, which have been used to get some information about the slacking are actually not the correct ones. Additionally, they are not absolutely correct for objects, which are that long compared to its cross-section. Nevertheless, they are only used to get a feeling for the programming part. Therefore, it is enough to have those equations used.

There are no calculations, if three robots are transporting the rebar because it was planned to simulate the worst case scenario first. Afterwards, some realistic situations should be developed in the physics engine.

9.2 Selection of suitable physics engines

Before starting a work like that, it is important to research the state of the art to know about already existing projects in that area. A physics engine is used in every computer game and animated films. However, also simulation software uses those kind of programs. The main part are digital games, where such an engine is necessary to build an environment and actually its whole world. The documentation about using physics engines in other programs is quite weak. Moreover, it is difficult to find any projects, which consist of this kind of problem.

As a consequence, that is the reason, why it was not possible to use information out of existing projects to get started. Especially the combination of physics engine with the ABB's simulation software does not exist. So far, the literature research did not have any positive results, which would help any further. Therefore, some general information about programming physics engines and RobotStudio were tried to be found.

9.3 Used programs

As already showed, some criteria for the physics engines have been chosen to be able to compare them. Programming language, the license and the type were the most important ones. Based on those characteristics, the bullet physics was chosen to start with. Some more information, which came up later on, induced a change to the open dynamics engine. In conclusion, this one was used until the end afterwards.

9.3.1 Microsoft Visual Studio

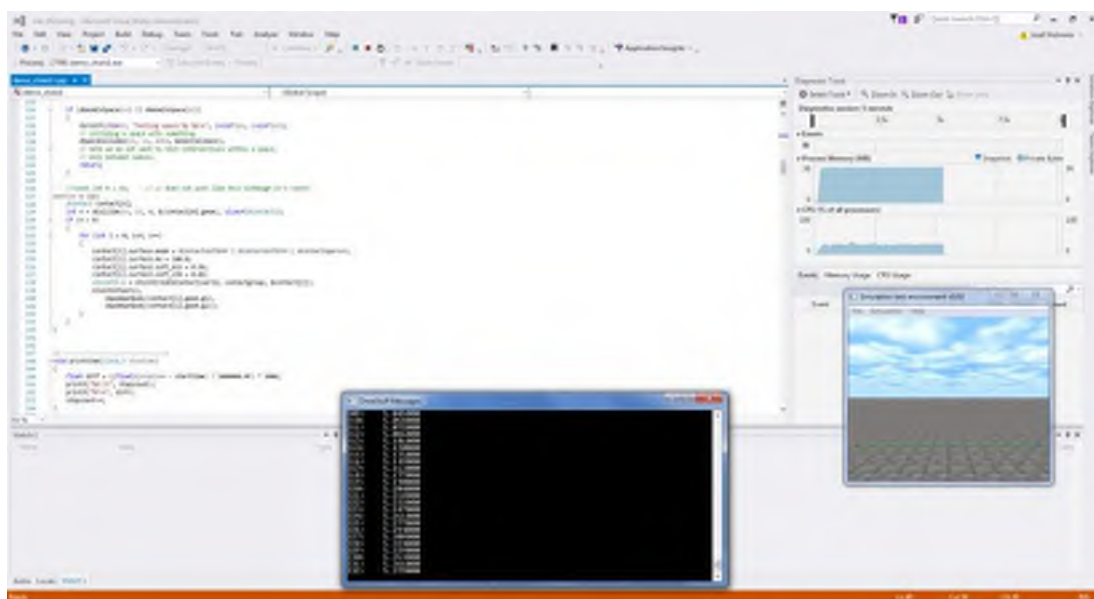


Figure 19: Screenshot of Microsoft Visual Studio

Compiled programming languages, like for example C/C++ or C#, need a compiler and linker. This provides to receive an executable program out of the source code. There are many different systems available, which could be used. The most common software is probably Microsoft Visual Studio. Besides that, it is provided for free and contains of compilers for the most popular programming languages. It is only available for Windows. Nevertheless, Visual Studio is not only compiler and linker. It is an integrated development environment, which means that it includes a text editor for source code, as well as a source-level and machine-level debugger. [13] In Figure 19, the project is opened and running in Visual Studio. Two windows appear on the screen, which display the simulation and the calculation steps.

Physics engine – bullet physics

As already mentioned above, this kind of physics engine is used for rigid-bodies. Bullet physics is freeware, so the source code can be downloaded online from the homepage *bulletphysics.org*. In addition, they offer also a Portable Document Format file (PDF) with some descriptions to get started.

Bullet Physics is an engine, which is used to simulate rigid-bodies and non-elastic forms that can be deformed (soft body dynamics). It is used in computer games as well as in films for visual effects. Bullet's collision detection is high developed. The number of available constraints of objects is high in this engine.

Physics engine – open dynamics engine

All things considered, this physics engine is open source. It can be used for simulating rigid bodies and detecting collisions. Its full source code is available and can be adapted too, if necessary. This program was used because it is more detailed than bullet physics. Another plus for the open dynamic engine is that there are a lot of differently working samples, which help to get into programming faster. They can be easily used and modified for special requests.

Add-in for RobotStudio

Microsoft Visual Studio provides the possibility of developing an add-in for RobotStudio. An additional extension, a software developer kit is necessary to be able to compile the code properly for ABB's software. This can be downloaded on the developer homepage for RobotStudio programmers (<http://developercenter.robotstudio.com/Downloads>). After the latest version is installed, programming an add-in can be started. After all, it is also possible to start with a code sample, which makes it easier to get into that topic for the first time.

9.3.2 ABB simulations software RobotStudio

RobotStudio is ABB's simulation and programming software for their own robots. Moreover, it works either online or offline. This allows robot programming without shutting down the production. [14] RobotStudio shows the robots, as they look like in real-life. Every single machine, which is sold by ABB can be added into the program. Additionally, it is possible to add objects of the environment. Standard CAD files like *step* format can be imported and visualized. This makes it easier to imagine what the whole system would look like and if changes are necessary before realizing it. Collisions can be detected quite easy with that software. It helps to find mistake from the planning stage.

Another advantage for this kind of software is the possibility of improving cycle times quite simple. Unnecessary movements can be changed easily. When the programming process is finished, the developed code can be transferred to directly to the robot(s). Using a cable or a memory stick can be used for transmitting the program. If for example a programmable logic controller (PLC) is included in a project in real-life, it is not difficult to include its communication. Besides that, it is possible to add pseudo devices, which stand for objects that are interacting with the robots' controllers.

For programming the robots online, the teach pendant can be used. Their remote can also be displayed on the computer in the simulation software. Furthermore, it looks exactly like the real one and works exactly the same (see Figure 20). This provides the possibility to practice working with those machines, before a real one is moved. The risk of any damage is reduced immense.

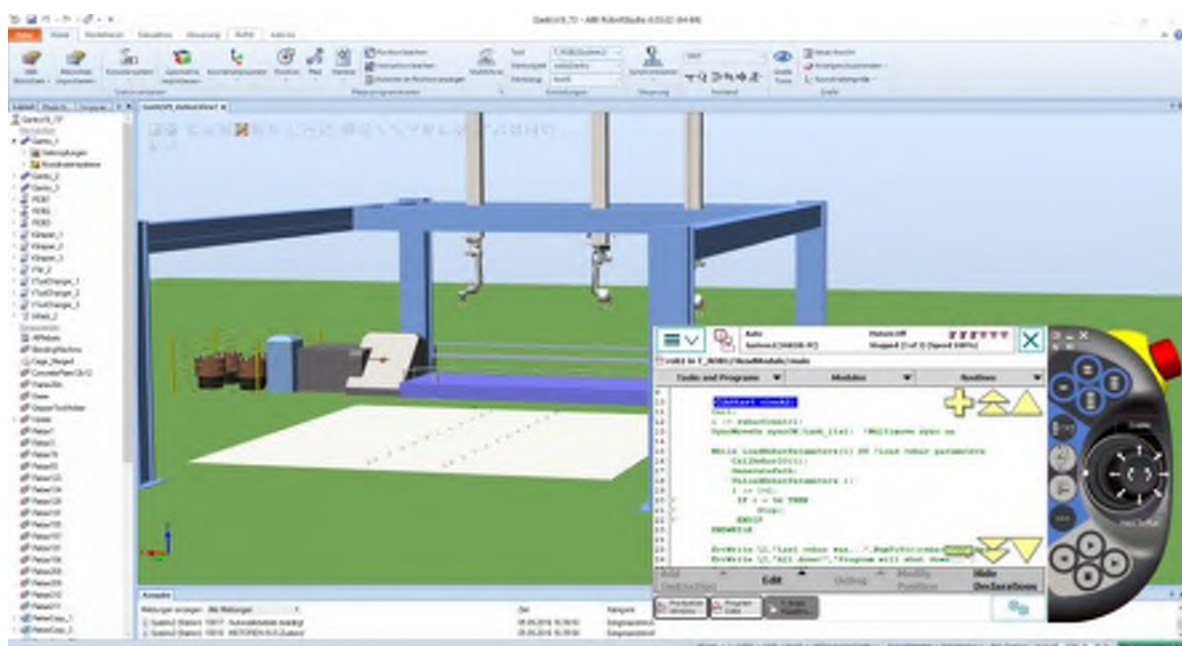


Figure 20: Screenshot of RobotStudio

RobotStudio does not contain of a physics engine. In addition, it is not possible to show dynamic behaviors of objects in this software. An external program is needed to be able to simulate moving parts based on their ballistics. A project team, working for ABB, developed a n add-in, which makes it possible to visualize a robot's hoses. They are moving dynamically, whenever the robot is exercising. This means that this program contains of an engine, which allows visualizing dynamic movements. The source code of this sub-program is not available online. Therefore, no knowledge could be gain out of the *Hose Simulator*. It does not offer any hints about how it was realized. However, having a program, which probably works with a physics engine, which is included in RobotStudio, showed that it must be possible to implement such an engine in the simulation software.

In this project, the whole gantry is simulated in RobotStudio. Everything, that will be part of the real version, exists in the software as well. However, it helps to imagine, what it will look like and what needs to be adapted before realizing it. All robots were programmed in this system. Besides that, the bending machine, as well as the crane, who lifts the finished rebar cage is simulated roughly. Not their exact work principle could be added, but the spot, where the reinforcing bars are grabbed by the robots is very important for developing useful code.

ABB uses its own language for programming their robots, it is called RAPID. The user needs to know a great deal of details to make himself understood. Its editor provides a developer environment, which is quite similar to Microsoft Visual Studio. It supports, while writing the robot's program, with giving suggestions for expressions. There are arguments that are filled in automatically and RobotStudio additionally gives feedback on the correctness of the code. [2]

9.3.3 Code transfer between different programming languages

Those two programs, which are described above, have been used for this thesis. Microsoft Visual Studio was used for programming the physics engine on the one hand and the add-in on the other hand. The engine was programmed in C++. Add-ins for RobotStudio need to be written in C#. Usually, those two languages are not compatible with each other. This means that it is necessary to use some kind of translator. A so called wrapper opens the possibility of mixing several programming languages.

Figure 21 shows, how the programmed code should be transferred and translated to be able to use more than one language. The simulation software RobotStudio exports the data to a developed Add-in. This works in C# and transfers the data about the rebar's behavior to a code wrapper, where the program lines are interpreted as C++. After the physics engine gets the files, it starts calculating the rebar's behavior. Moreover, it determines, how it would behave in the prevailing conditions in RobotStudio. The results will be sent back to the wrapper because it is necessary to translate the C++ code back to C# again. The rapper

transfers its produced lines further to the Add-in in RobotStudio. This sub-program gives its received information to the controller. Depending on error routines, the robots will react on collisions or other behaviors of the rebars.

It is actually recommended to use named pipes instead of the wrappers. Besides that, it is more common as well to make use of those pipes. They make it possible to let two programs communicate with each other, even though they are using two different languages.

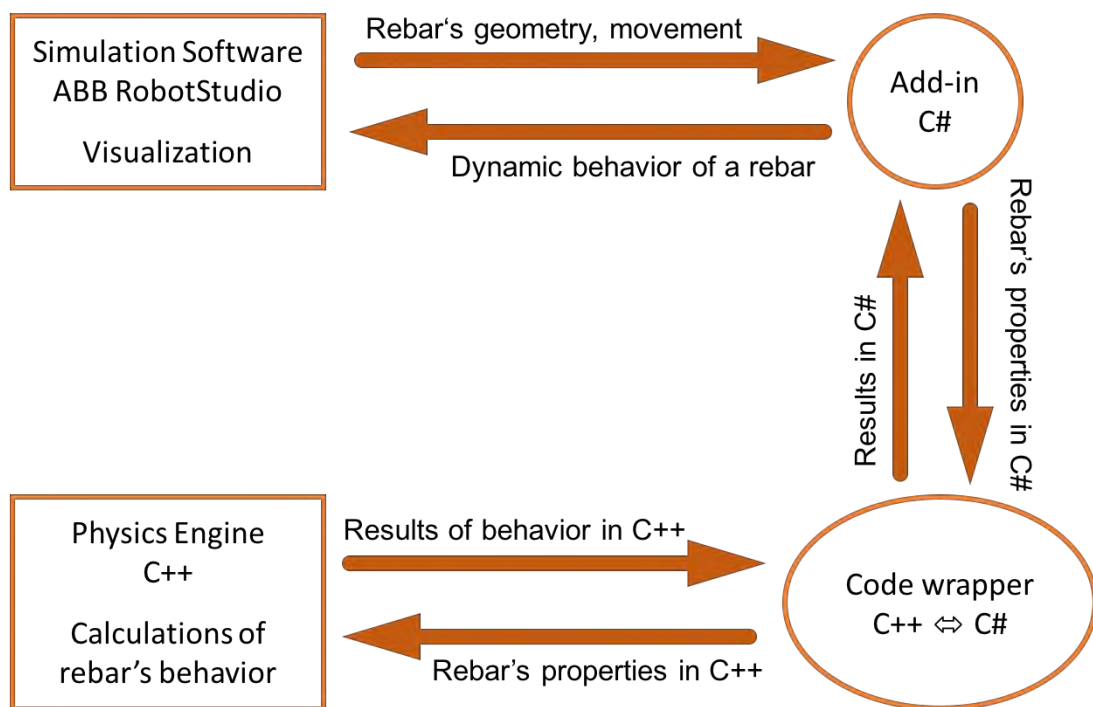


Figure 21: Overview of code transfer

The time was not enough for implementing neither a code wrapper, nor named pipes. However, a much simpler version was used to transfer data from RobotStudio to Microsoft Visual Studio. The robot software exported the machine's tool center point (TCP) to a text file. The time was saved, when the position was saved. This means that every time, the position is written into the external file, the time is copied there as well. Of course the position and rotations are sent as well. The x-, y- and z-coordinates and the w-, q- and r-angles are transferred to the text file.

The code below shows RobotStudio's output into the text file, which is opened by the physics engine afterwards.

```

14:28:10
1270.00x0.00y1570.00z0.00w90.00q0.00r
  
```

The code below is the program for RobotStudio that exports the TCP of a robot into a text file. As already mentioned, it is a simple way of communication between the robot software and the physics engine in Microsoft Visual Studio. To get a better understanding of this code, it will be described shortly.

Programming *RAPID* deviates a bit from the common programming languages like C++ or C#. The declaration of types works different because it always must be defined, whether it is a static or variable value.

```
MODULE ExportTCP
```

```
PROC main()
```

Robtarget saves the current position of the TCP of one robot. The other variables below are needed to write data into files. Numbers and strings are used for saving counters or time.

```
VAR robtarget cur_pos;  
    VAR iodev logfile1;  
    VAR iodev logfile2;  
    VAR num counter_num;  
    VAR string counter_str;  
  
    ! Times  
    VAR clock clock2;  
    VAR num stopped_time;  
    VAR string system_time;  
  
    ! Strings  
    VAR string Text;  
    VAR string new_line;  
    VAR string current_position;
```

The following variables consist of the values of the position and the rotation. They need to be written into string types as well to be able to write them into a text file afterwards.

```
! StringSearch Numbers  
VAR num x;  
VAR num y;  
VAR num z;  
VAR num w;  
VAR num q;
```

```

VAR num r;

! Coordinates
VAR string x_axis;
VAR string y_axis;
VAR string z_axis;
VAR string x_angle;
VAR string y_angle;
VAR string z_angle;

counter_num := 1;

```

There are two different files for the position of the robot. One of them clears the file every time, something is added. The other one just adds the new data under the previous content.

```

WHILE TRUE DO
  Open "pose_current.txt", logfile1 \Write;
  Open "pose_append.txt", logfile2 \Append;
  ClkReset clock2;
  ClkStart clock2;

  ClkStop clock2;

  system_time := Ctime();
  !Write logfile1, system_time;
  Write logfile2, system_time;

  stopped_time := ClkRead(clock2 \HighRes);
  Text := NumToStr(stopped_time,6);
  Text := StrMap(Text, ".", ",");
  Write logfile2, Text;

```

The function below saves the current position of the robot's TCP into a variable. Afterwards it gets transferred into a string variable. Further on, this information is exported and stored separately.

```

Cur_pos := CrobT();
current_position := RobtargetToString(cur_pos);

x := StrMatch(current_position,1,"x");
y := StrMatch(current_position,1,"y");

```

```

z := StrMatch(current_position,1,"z");
w := StrMatch(current_position,1,"w");
q := StrMatch(current_position,1,"q");
r := StrMatch(current_position,1,"r");
r := r-q;
z_angle := StrPart(current_position,q+1,r-1);
q := q-w;
y_angle := StrPart(current_position,w+1,q-1);
w := w-z;
x_angle := StrPart(current_position,z+1,w-1);
z := z-y;
z_axis := StrPart(current_position,y+1,z-1);
y := y-x;
y_axis := StrPart(current_position,x+1,y-1);
x_axis := StrPart(current_position,1,x-1);

counter_str := NumToStr(counter_num,0);

```

The files are written below. It is not possible to print “new line” in RAPID. This means that position and rotation are printed in only one line next to each other. This makes extracting the information more complicated, but not impossible.

```

!Write logfile1, current_position;
!Write logfile1, " ";
!Write logfile1, "Axis:";
Write logfile1, counter_str;
counter_num := counter_num+1;
Write logfile1, x_axis;
Write logfile1, y_axis;
Write logfile1, z_axis;
!Write logfile1, " ";
!Write logfile1, "Angles:";
Write logfile1, x_angle;
Write logfile1, y_angle;
Write logfile1, z_angle;
Close logfile1;

Write logfile2, current_position;
Close logfile2;
WaitTime 1.0;
ENDWHILE

```

ENDPROC

The function *RobtargetToString()* converts the robot's position, which is saved as *robtarget* into a string file. Of course the position and orientation need to be extracted stored separately.

```
FUNC string RobtargetToString(robtarget RT)
  VAR string position;
  VAR string ori;
  VAR num ax;
  VAR num ay;
  VAR num az;
  position := NumToStr(RT.trans.x, 2) + "x" +
NumToStr(RT.trans.y, 2) + "y" + NumToStr(RT.trans.z, 2) + "z";

  ax := EulerZYX(\X, RT.rot);
  ay := EulerZYX(\Y, RT.rot);
  az := EulerZYX(\Z, RT.rot);

  ori := NumToStr(ax,2) + "w" + NumToStr(ay,2) + "q" +
NumToStr(az,2) + "r";
  RETURN position + ori;
ENDFUNC
```

ENDMODULE

9.4 Program code development

This chapter is about the programming itself. The whole code, which was developed to move a rebar is shown and described in this section. Additionally, the simulation part *drawstuff* of the engine is covered here. A figure of the rebar, which is slacking because of its dead load is viewed.

9.4.1 Procedure of programming

As already mentioned, before programming the physics engine ODE, bullet physics was used. Open dynamics engine is more detailed than the other one, which induced this change. ODE first needs to be installed on the computer. This adds a lot of different sample programs, which can be used or adapted for specific needs. All of them have been run to see, how they

work and what they are good for. Some have similar simulations, as it needed for a rebar. The one, which was closest to the topic of this project, was chosen and modified.

That sample is called *demo_feedback.cpp*. It simulates a suspension bridge, which consists of rectangular parts, which are much wider than high. There are some blocks, which are falling down onto the bridge. They are breaking the bridge, so the two parts are hanging down on the floor. The easiest way to get further seemed to be adapting this code and changing the planks into something that looks like a rebar. First of all, the falling blocks were removed because they are not needed for this project.

It was planned to not have a rebar, which consist of only one single part, but have small pieces. This should help to have a more detailed response on the rebar's behavior, when it is moved. The code also includes a function to change the reinforcing bar's color. Whenever there is some stress acting on it, it changes its color from green over yellow and orange to red. The bigger the force get, the darker the color becomes.

9.4.2 Physics engine

This chapter shows the code, that belongs to the ODE itself, which has been modified for this project. The form of the planks had to be changed, as well as the number of objects. Additionally, the blocks, which were falling down on the suspension bridge, were removed because they are not needed at all.

Like in every C++ program, it is necessary to include some libraries. They contain functions, which are used in the code, but do not have to be developed again. The first lines have already been included. *Ode.h* has some operations, which are necessary for the physics engine. The *drawstuff.h* library runs the simulation after compiling.

```
#include <stdio.h>
#include "ode/ode.h"
#include "drawstuff/drawstuff.h"
#include "texturepath.h"
#include "icosahedron_geom.h"
```

The included libraries below have been added manually. They are necessary for special calculations or data. The *stream* libraries for example are needed to be able to input a text file into Microsoft Visual Studio.

```
// ----->
using namespace std;

#ifdef HAVE_UNISTD_H
```

```

#include <unistd.h>
#endif
#include "ode/odeconfig.h"
#include "assert.h"
#include <time.h>
#include <string>
#include <iostream>
#include <fstream>
#include <sstream>
#include <stdlib.h>

#include <Windows.h>
// <-----
#ifdef MSCVER
#pragma warning(disable:4244 4305) // for VC++, no precision loss
complaints
#endif

```

All commands, which start with “d” or “ds” are part of drawstuff. This means that they have something to do with the simulation.

```

// select correct drawing functions
#ifdef dDOUBLE
#define dsDrawBox dsDrawBoxD
#define dsDrawCylinder dsDrawCylinderD
#endif

```

The next section below contains some constants, which define the rebar’s shape. The whole length is 12 units. One single part is 0.1 units long, which means that it consists of 120 separate small cylinders in total, which must be defined. In this program, the constant variable NUM contains that value. Every object has a virtual, invisible box around it. For the engine, not the object itself is important, but the calculated stuff. Also the mass of the box needs to be defined. To be able to visualize the rebar, its diameter and the lengths in all three dimensions are necessary to be included.

```

// ----->
// some constants -> cylinder
#define REBARLENGTH 12 // length of a whole rebar
#define LENGTH (0.1) // length of one single cylinder
#define SIDE LENGTH // side length of a box
// Please enter manually: NUM = REBARLENGTH/LENGTH

```



```

#define NUM (120)                // number of single cylinders
and boxes
#define MASS (4.0*SIDE)          // mass of a box
#define RADIUS (0.025f)          // cylinder radius
#define DENSITY 7850             // density of rebars
static const float RebDim[3] = { (2 * RADIUS), LENGTH, (2 * RADIUS)
};

```

The static variables are necessary for the colored feedback of the rebar. They need to be set for making sure that the color changes, if any force appears to the objects.

```

// variables for simulating the color change
static dJointFeedback jfeedbacks[NUM];
static int stress[NUM - 1];
dMatrix3 rotation;
static dReal colours[NUM];

```

The variables below were used in an earlier state of the project to count the time and steps to test, if the physics engine keeps running in the background even if the simulation is stopped.

```

Int stepcount = 0;               // number of steps between timesteps
clock_t starttime;              // time of start

int loopcount=0;                // number of calculation steps in simloop

```

The *pillar* variables were added in the end, when moving the rebars was aimed. Those stacks should be like pillars under the rebar, holding it.

```

// variables for the pillars => was used only for tests
#define pillarCNT (3)           // nr of stackparts
static dBodyID pillarbodies[pillarCNT];
static dGeomID pillargeoms[pillarCNT];
static const float pillarDim[3] = { 0.1, (2 * LENGTH), (3 - RADIUS)
};
#define DENSITY_pillar 1000000

```

The coordinates for the rebar are imported from RobotStudio. This requires some variables, where this data can be saved. It is necessary to save the variables from letters to numbers without losing any level of details. The numbers must be as exact as they come from RobotStudio.

```

// coordinates from RobotStudio
string 54ords[6];          // import of coordinates from robotstudio
are saved here
double coordinates[6];     // coordiantes from robotstudio are
transferred to double and saved here
string startsignal;        // start signal for importing the
coordinates
int startbit;              // startsignal is changed to integer
int prev_startbit = 0;     // used to compare with previous value

// things that the user controls => was used only for tests
static dReal speed = 0;    // speed of item
static dReal steer = 0;    // rotation of wheels

int j = 0;
// <-----

```

The static variables below are necessary for the simulation. They generate the whole world. An environment, the geometries of the object and their joints are sent to drawstuff, which creates the virtual space. Those code expressions are marked with a “d” in front of the variable types. This indicates that they belong to drawstuff as well.

```

// dynamics and collision objects
static dWorldID world;
static dSpaceID space;
static dGeomID cylinder[NUM];
static dBodyID body[NUM];
static dJointID joint[NUM - 1];
static dJointGroupID contactgroup;

```

Declaring all functions in the beginning makes it easier to use them. The order does not matter anymore. They can be rearranged afterwards easily as well.

```

// ----->
// function declaration
static void nearCallback(void *data, dGeomID o1, dGeomID o2);
void printtime(clock_t stoptime);
static void start();
void drawGeom(dGeomID g);
static void inspectJoints(void);

```

```

void SetPosition(int choice, int i);
const void SetRotation(dBodyID b);
void CreateSlider(int slidnum, int bodynum);
static void simLoop(int pause);
static void command(int cmd);
void getCoordinates();
void readin();
void compareCoords();
void copyFile();
void txt2num();
int main(int argc, char **argv);
// <-----

```

The declaration and initialization of the variables is finished now. The first function below calculates collisions. It tests, if anything is in touch with another object. If this happens, the physics engine tries to choose a behavior that is as close as possible to a real one. This means that a solid body gets reject if it touches the ground.

```

// function which checks for collisions
static void nearCallback(void *data, dGeomID o1, dGeomID o2)
{
    assert(o1);
    assert(o2);

    if (dGeomIsSpace(o1) || dGeomIsSpace(o2))
    {
        fprintf(stderr, "testing space %p %p\n", (void*)o1,
(void*)o2);
        // colliding a space with something
        dSpaceCollide2(o1, o2, data, &nearCallback);
        // Note we do not want to test intersections within a
space,
        // only between spaces.
        Return;
    }

    //55ords55int N = 32;      // => does not work like this
although it's const!
#define N (32)
    dContact contact[N];

```

```

        int    n    =    dCollide(o1,    o2,    N,    &(contact[0].geom),
sizeof(dContact));
        if (n > 0)
        {
            for (int I = 0; i<n; i++)
            {
                contact[i].surface.mode    =    dContactSoftERP    |
dContactSoftCFM | dContactApprox1;
                contact[i].surface.mu = 100.0;
                contact[i].surface.soft_erp = 0.96;
                contact[i].surface.soft_cfm = 0.02;
                dJointID    c    =    dJointCreateContact(world,
contactgroup, &contact[i]);
                dJointAttach(c,
                            dGeomGetBody(contact[i].geom.g1),
                            dGeomGetBody(contact[i].geom.g2));
            }
        }
    }
}

```

This is the function, which was used to display the time, when the program was started. Additionally, a step counter was shown to see every single time, a calculation was made. This was helpful to get a better understanding of how the code works.

```

// ----->
void printtime(clock_t stoptime)
{
    float diff = ((float)(stoptime - starttime) / 1000000.0F) *
1000;
    printf("%d:\t", stepcount);
    printf("%f\n", diff);
    stepcount++;
}
// <-----

```

The simulation was started with the function called “start”. The position of the observer can be set in position and rotation. The mouse cursor can be used afterwards to move the camera position, zoom in or out. Of course the camera can be rotated as well manually.

```

// start simulation - set viewpoint
static void start()

```

```

{
    // ----->
    static float xyz[3] = { 8.0000f, 6.0000f, 3.0000f };
    // y = yaw => pos = counter clockwise
    // p = pitch => pos = up
    // r = roll => pos = left
    static float ypr[3] = { 180.0000f, 0.0000f, 0.0000f };
    // <-----

    dAllocateODEDataForThread(dAllocateMaskAll);
    dsSetViewpoint(xyz, ypr);

    printf("Press:\t'f' to increase speed.\n\t's' to decrease
speed.\n\n");}

```

Now, the geometries are built with the following function below. It is defined where it should be and how it is turned. The type of the objects is programmed here as well. Depending on the wanted shape, the appropriate form needs to be chosen of course.

```

Void drawGeom(dGeomID g)
{
    const dReal *pos = dGeomGetPosition(g);
    const dReal *R = dGeomGetRotation(g);

    int type = dGeomGetClass(g);
    if (type == dBoxClass)
    {
        dVector3 sides;
        dGeomBoxGetLengths(g, sides);
        dsDrawBox(pos, R, sides);
    }
    else if (type == dCylinderClass)
    {
        dReal r, l;
        dGeomCylinderGetParams(g, &r, &l);
        dsDrawCylinder(pos, R, l, r);
    }
}

```

The joints between two single pieces of the rebar shall be defined as well. There are more possibilities for joints, when programming the ODE. The force limit was regulated with 2000. This means that the connection will break, if 2000 is reached. There is no unit for that value. Additionally, there was no information in the physics engine's code about this variable. The limit was set already in the original demo program to that value. It was not changed so far. It needs to be modified, after more experience will be made.

The color is also regulated in this function. Depend on the stress on the objects, the color is calculated and simulated afterwards. The stress limit plays a role because it changes to dark red in the moment, the joint is breaking and the bodies lose their connection.

```

Static void inspectJoints(void)
{
    const dReal forcelimit = 2000.0;
    int I;
    for (I = 0; i<NUM - 1; i++)
    {
        if (dJointGetBody(joint[i], 0))
        {
            // This joint has not snapped already... inspect it.
            dReal l0 = dCalcVectorLength3(jfeedbacks[i].f1);
            dReal l1 = dCalcVectorLength3(jfeedbacks[i].f2);
            colours[I + 0] = 0.95*colours[I + 0] + 0.05*l0 /
forcelimit;
            colours[I + 1] = 0.95*colours[I + 1] + 0.05*l1 /
forcelimit;
            if (l0 > forcelimit || l1 > forcelimit)
            {
                stress[i]++;
            }
            else
            {
                stress[i] = 0;
            }
            if (stress[i]>4)
            {
                // Low-pass filter the noisy feedback data.
                // Only after 4 consecutive timesteps with
excessive load, snap.
                Fprintf(stderr, "SNAP! (that was the sound of
joint %d breaking)\n", i);
                dJointAttach(joint[i], 0, 0);
            }
        }
    }
}

```

```

        }
    }
}
// ----->
clock_t stoptime;
stoptime = clock();
printtime(stoptime);
// <-----
}

```

The position of the objects can and shall be defined as well as the viewer's spot. Some loops have been programmed to save time and keep the code more structured. All bodies and joints need to be set at their right position to make sure their influence appears on the correct position. The coordinates for the rebar are imported from RobotStudio. Depending on the robot's position there, the reinforcing bar is set on different positions in the beginning. This works only for the position in the beginning. It is not possible yet to reload the data and move the object in the physics engine.

```

// set position of the rebar
// ----->
void SetPosition(int choice, int i)
{
    // using the coordinates from robotstudio
    dReal x0 = coordinates[0];
    dReal z0 = coordinates[2];

    // first set the rebar
    if (choice == 1) // rebar parts
    {
        //dReal y0 = (I + 0.5)*LENGTH;
        dReal y0 = coordinates[1] + (I + 0.5)*LENGTH;
        dBodySetPosition(body[i], x0, y0, z0);
    }
    // second set the hinges
    else if (choice == 2) // hinge positions
    {
        //dReal y0 = (I + 1)*LENGTH;
        dReal y0 = coordinates[1] + (I + 1)*LENGTH;
        dJointSetHingeAnchor(joint[i], x0, y0, z0);
    }
    // at last set the pillars
}

```

```

else if (choice == 3) // pillar => only used for tests
{
    dReal y0 = i*(REBARLENGTH / 2) + LENGTH;
    if (I == 0)
    {
        y0 = LENGTH;
    }

    z0 = (3 + RADIUS) / 2 + RADIUS / 2;
    dBodySetPosition(pillarbodies[i], x0, y0, z0);
}
else
{
    printf("wrong choice of parameters for setting
position.");
}
}
// <-----

```

This function was written to set the rotation for example of every single part of the rebar. It saved a lot of time to have just a view lines once instead of having them whenever it is necessary to set the rotation of a body for the simulation.

```

// setting the rotation of the rebar
// ----->
const void SetRotation(dBodyID b)
{
    const dReal *R1;
    dMatrix3 R2;
    R1 = dBodyGetRotation(b);
    dRFromAxisAndAngle(R2, 1, 0, 0, 1.57); // numbers
are chosen with trial and error
    dMultiply0(rotation, R1, R2, 3, 3, 3);
}
// <-----

```

Sliders are those pieces of the rebar, which do not move. They stay in their position from the beginning and do not slack under their dead load. In this thesis, three of the parts are defined as *sliders*. The first, last and the middle one are stiff bodies. Their index numbers are sent into this function, which creates those sliders.


```

// create the sliders = those points which simulate the robot holding
the rebar
// ----->
static dJointID sliders[NUM];

// creating the fixed segments of the rebar, which simulates the
robot-gripped parts
void CreateSlider(int slidnum, int bodynum)
{
    sliders[slidnum] = dJointCreateSlider(world, 0);
    dJointAttach(sliders[slidnum], body[bodynum], 0);
    dJointSetSliderAxis(sliders[slidnum], 0, 1, 0);
    dJointSetSliderParam(sliders[slidnum], dParamFMax, 1000.0);
    dJointSetSliderParam(sliders[slidnum], dParamLoStop, 0.0);
    dJointSetSliderParam(sliders[slidnum], dParamHiStop, 0.2);
}
// <-----

```

The function *simLoop* contains of the real simulation part. As its name already points out, it is a loop, which is running automatically. The user can stop the simulation and resume it again. Some commands are added in this part of the code, which should make it possible to move the rebar manually. This didn't work properly, but it was not deleted to help the person, continuing this project, saving time. The standard color of the object is chosen also in that function. A combination of red, green and blue, depending on their intensity, results a mixed color.

```

// the calculation for the simulations are done here
static void simLoop(int pause)
{
    int I = 0;
    double simstep = 0.002; // 2ms simulation steps
    double dt = dsElapsedTime();
    int nrofsteps = (int)ceilf(dt / simstep);

    // ----->
    //loopcount++;
    //cout << loopcount << endl;

    // this should move the rebar => sliders don't move, so the
    rebar just explodes
    /*

```

```

if (coordinates[1] <= 1)
{
    coordinates[1] += 0.01;

    for (I = 0; I < NUM; i++)
    {
        SetPosition(1, i);
    }

    for (I = 0; I < (NUM - 1); i++)
    {
        SetPosition(2, i);
    }
}
*/
// <-----

for (int j = 0; j <= 5; j++)
{
    dJointSetSliderParam(sliders[j], dParamVel2, speed);
}

for (I = 0; i<nrofsteps && !pause; i++)
{
    dSpaceCollide(space, 0, &nearCallback);
    //dWorldStep(world, 0.05);      // Step a world for 0.01
[sec]
    dWorldQuickStep(world, simstep);
    dJointGroupEmpty(contactgroup);
    inspectJoints();
}

/*
// ----->

// motor
dJointSetHingeParam(joint[0], dParamVel2, -speed);
dJointSetHingeParam(joint[0], dParamFMax2, 0.1);

// steering
dReal v = steer - dJointGetHingeAngle1(joint[0]);

```

```

if (v > 0.1) v = 0.1;
if (v < -0.1) v = -0.1;
v *= 10.0;
dJointSetHingeParam(joint[0], dParamVel, v);
dJointSetHingeParam(joint[0], dParamFMax, 0.2);
dJointSetHingeParam(joint[0], dParamLoStop, -0.75);
dJointSetHingeParam(joint[0], dParamHiStop, 0.75);
dJointSetHingeParam(joint[0], dParamFudgeFactor, 0.1);

dSpaceCollide(space, 0, &nearCallback);
dWorldStep(world, 0.05);

// remove all contact joints
dJointGroupEmpty(contactgroup);
// <-----
*/

for (I = 0; i<NUM; i++)
{
    float r = 0;    // red
    float g = 0;    // green
    float b = 0.2;  // blue
    float col = colours[i];

    if (col > 1.0)
    {
        col = 1.0;
    }
    if (col < 0.5)
    {
        r = 2 * col;
        g = 1.0;
    }
    else
    {
        r = 1.0;
        g = 2 * (1.0 - col);
    }

    dsSetColor(r, g, b);
    drawGeom(cylinder[i]);
}

```

```

    }

    dsSetColor(1, 1, 1);
    /*
    for (I = 0; i<pillarCNT; i++)
    {
        drawGeom(pillargeoms[i]);
    }
    */
}

```

It is already included in this program to be able to enter letters, which in- or decrease the variable *speed*. This could be used to change the rebar's velocity.

```

// called when a key pressed
static void command(int cmd)
{
    // ----->
    switch (cmd)
    {
        case 'f': case 'F':
            speed += 0.3;
            break;
        case 's': case 'S':
            speed -= 0.3;
            break;
    }
    // <-----
}

```

The following functions load the robot's position from RobotStudio into the physics engine. It is necessary to have more steps to convert the characters into numbers. The first part is to get the coordinates from the text file

```

// get the coordinates from robotstudio
// ----->
void getCoordinates()
{
    readin();
    //compareCoords();
}

```

The function below calls two other operations: One of them copies the file, where the coordinates have been saved. The other one converts the characters to numbers. Afterwards, the unit has to be changed to be compatible with the physics engine.

```
Void readin()
{
    copyFile();
    txt2num();

    // Convert unit of coordinates
    for (int I = 0; I <= 5; i++)
    {
        coordinates[i] /= 100;
    }
}
```

The new coordinates are compared with the previous ones to see, whether the position has changed.

```
Void compareCoords()
{
    while (startbit != prev_startbit + 1)
    {
        getCoordinates();
    }
    prev_startbit++;
}
```

The text file, where the coordinates have been saved, is read in here and copied to a new one. This guarantees that the original register is ready to receive new positions of the robot. RobotStudio can start writing in there immediately again.

```
// Read in the file with the coordinates
void copyFile()
{
    ifstream inFile;
    ofstream outFile;
```

```

        inFile.open("C:/Users/Sebastian/Dropbox/FH/MMR4/MasterThesis/
Programmierung/05_June/Station_2016-06-
02/Systems/IRB_4600_60kg_2.05m/HOME/pose_current.txt", ios::in);
        outFile.open("RobotStudio.txt", ios::out);

        //cout << endl << "readFile" << endl;
        // read in from file
        getline(inFile, startsignal);
        for (int I = 0; I <= 5; i++)
        {
            getline(inFile, 66ords[i]);
            //cout << 66ords[i] << endl;
        }

        //cout << endl << "writeFile" << endl;
        // write data into new file
        outFile << startsignal << "\n";
        for (int I = 0; I <= 5; i++)
        {
            outFile << 66ords[i] << "\n";
            //cout << 66ords[i] << endl;
        }

        inFile.close();
    }

```

It is impossible to calculate with variables that are saved as characters. Therefore, the function below, which converts the data to a type *double* variable, is necessary.

```

// Convert string to double
void txt2num()
{
    //cout << endl << "txt2num" << endl;

    for (int I = 0; I <= 5; i++)
    {
        int round;
        stringstream ss(66ords[i]);
        ss >> coordinates[i];
        // << 66ords[i] << endl;
    }
}

```

```

        //coordinates[i] *= 100;
        //round = (int)coordinates[i];
        //coordinates[i] = round;
        //coordinates[i] /= 100;
        //coordinates[i] = atof(67ords[i]);
    }

    stringstream ss(startsignal);
    ss >> startbit;
    //cout << startbit << endl;
}
// <-----

```

The *main* function is the most important part of the code. This is the first called operation. The order, in which the functions above are called is defined in this routine. Some local variables are used here as well, which are not needed for the rest of the program. The simulation function *simLoop* is called in the beginning, before any other calculations are made. This lets drawstuff begin working immediately after the program was started. But before anything happens at all, the system time is saved to know about the exact point of time, the program was run.

```

Int main(int argc, char **argv)
{
    int I;
    dMass m;

    // ----->
    starttime = clock();
    getCoordinates();
    // <-----

    // setup pointers to drawstuff callback functions
    dsFunctions fn;
    fn.version = DS_VERSION;
    fn.start = &start;
    fn.step = &simLoop;
    fn.command = &command;
    fn.stop = 0;
    fn.path_to_textures = DRAWSTUFF_TEXTURE_PATH;
}

```

After the simulation started running, the world can be designed in it. Also the gravity can be chosen by the programmer. For this project, the real value was defined of course. The bodies are created afterwards. Their position and rotation is set immediately. It is important to choose the object's shape and mass too.

```

// create world
dInitODE2(0);
world = dWorldCreate();
space = dHashSpaceCreate(0);
contactgroup = dJointGroupCreate(0);
// ----->
dWorldSetGravity(world, 0, 0, -9.81);
dWorldSetQuickStepNumIterations(world, 20);
// <-----
dCreatePlane(space, 0, 0, 1, 0);

// create body
for (I = 0; i<NUM; i++)
{
    body[i] = dBodyCreate(world);
    // ----->
    // Set body rotation:
    SetRotation(body[i]);
    // Set body rotation:
    dBodySetRotation(body[i], rotation);
    // Set body position:
    SetPosition(1, i);
    // <-----

    dMassSetBox(&m, DENSITY, RebDim[0], RebDim[1],
RebDim[2]);
    dMassAdjust(&m, MASS);
    dBodySetMass(body[i], &m);
    cylinder[i] = dCreateBox(0, RebDim[0], RebDim[1],
RebDim[2]);
    dGeomSetBody(cylinder[i], body[i]);
    dSpaceAdd(space, cylinder[i]);
    // ----->
    // Create cylinders:
    cylinder[i] = dCreateCylinder(space, RADIUS, LENGTH); //
create cylinders

```



```

        dGeomSetBody(cylinder[i], body[i]);
        // <-----
    }

```

After the bodies are generated, the hinges, which connect always two of those cylinders, are produced. The feedback of the acting stress is defined in this function as well. Actually the point, where it should appear, needs to be chosen.

```

// Create joints
for (I = 0; I < (NUM - 1); i++)
{
    joint[i] = dJointCreateHinge(world, 0);
    dJointAttach(joint[i], body[i], body[I + 1]);
    // ----->
    SetPosition(2, i);

    dJointSetHingeAxis(joint[i], 1, 0, 0);
    dJointSetHingeParam(joint[i], dParamFMax, dInfinity);

    // Here we tell ODE where to put the feedback on the
    forces for this hinge:
    dJointSetFeedback(joint[i], jfeedbacks + i);
    stress[i] = 0;
    // <-----
}

// ----->
// Create pillars
for (I = 0; i<pillarCNT; i++)
{
    pillarbodies[i] = dBodyCreate(world);
    dMassSetBox(&m, DENSITY_pillar, pillarDim[0],
pillarDim[1], pillarDim[2]);
    dBodySetMass(pillarbodies[i], &m);

    pillargeoms[i] = dCreateBox(0, pillarDim[0],
pillarDim[1], pillarDim[2]);
    dGeomSetBody(pillargeoms[i], pillarbodies[i]);
    SetPosition(3, i);
    dSpaceAdd(space, pillargeoms[i]);
}

```

```
// <-----
```

The indices for the sliders are chosen and sent here. The function *CreateSlider()* runs for every single slider that saves the rebar from falling down on the floor.

```
// ----->
// Create sliders for rebars
CreateSlider(0, 0);
CreateSlider(1, 1);
CreateSlider(2, (NUM / 2));
CreateSlider(3, (NUM / 2) + 1);
CreateSlider(4, (NUM - 2));
CreateSlider(5, (NUM - 1));
// <-----
```

After all bodies and object are created, the simulation can be started. As already mentioned, it is a loop, which stops running only, if the user presses pause. Otherwise it keeps on working. There is nothing in the code, which would stop the virtual world.

```
// run simulation
dsSimulationLoop(argc, argv, 352, 288, &fn);
```

The used memory needs to be released before the program is stopped. This reduces the waste on the computer of unnecessary files. The functions with *destroy* in their name clean the memory.

```
dJointGroupDestroy(contactgroup);
dSpaceDestroy(space);
dWorldDestroy(world);
dCloseODE();
return 0;
}
```

9.4.3 Simulation of the moving rebar

A simulation is an imitation of an actual or probable real life system, situation or event with its dynamic processes. A model, which can be used for experiments is necessary to gain knowledge that let draw conclusions to the reality. In addition, it helps to find reasons for past occurrences or a forecast of future events, assuming certain factors or circumstances. Simulations are a very useful tool and allow experiments without exposure to risk. Nevertheless, they are only a gross simplification of the reality including only a low number of real-life factors. [7] They are always only as good as their assumptions.

Examples for robotic tasks that are solved better using a simulation tool:

- Avoid static collision and circumvent obstacles
- Synchronize robot movements
- Plan gripping applications
- Analyze cycle time in real-time

For this project, using a separate physics engine outside of RobotStudio was necessary because it is not possible to show automatic dynamic behaviors in that software. Of course, robots are moving in the simulations, but they work as they were programmed before. They are not influenced by circumstances or obstacles in the program. Therefore, a physics engine is necessary, which calculates the dynamic moves of objects. So far, it was not necessary for ABB to develop an integrated system for those events. The programmer is responsible for avoiding collisions of the robots as well as the objects in the station. There are not a lot of projects in the world, where dynamic movements play a big role. This might be a reason, why it was not necessary for ABB to develop an engine for their software.

In this project, it is not possible to ignore the dynamic movements of the rebars. The reinforcing bars are too long in this case and therefore their slacking too much. This makes collisions too unpredictable and a physics engine is required. Integrating the engine directly into RobotStudio is not possible because there is no public access on the software's source code. Consequently, this is why the data is exported and transferred to the calculating program.



Figure 22: A rebar before it starts moving

As already mentioned above, the open dynamics engine uses drawstuff. This is a tool, which simulated the compiled code in a separated window. The whole environment exists in the drawstuff and does not have to be programmed specially. The clouds in the sky are moving and the floor is a solid object, which is a resistance to objects, touching it.

Figure 22 shows the rebar in the first second. It immediately starts moving because of its dead load. It is simulated that the bar is grabbed by three robots. Those machines are not simulated in this tool. Besides that, it only provides data from the rebar's dynamic behavior.

In Figure 23, the rebar is already moving. The first, last and the middle piece are staying in position. Those are the points, where theoretically the robots are gripping the rebar. The rebar's length is 12 units. It is divided into separate pieces, which are connected and react on the neighbors moves. The rebar below is not green anymore. It changed its color already to yellow. This suggests that there is some force influencing the reinforcing bar. In this case, it is the weight of the simulated object. The rebar is swinging up and down. Depending on the stress, the color turns from green to yellow and a bit orange back to green and so on. After some time, the body calms down and is almost green all over like in the beginning.

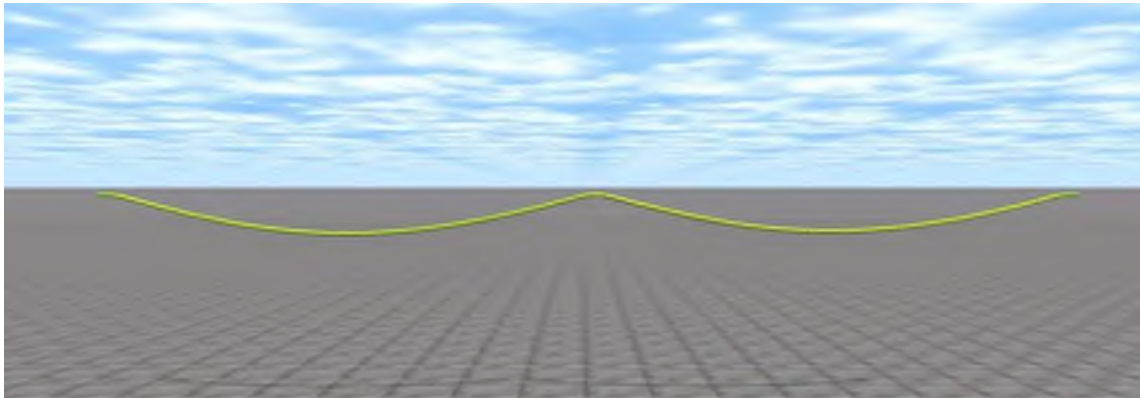


Figure 23: The moving rebar in a different color

9.4.4 Manual for using the physics engine

This chapter will give some advice for using the physics engine and continuing the project. It helps of course to acquire knowledge about those engines in general to be prepared for working on this topic. To run the physics engine's code in Microsoft Visual Studio, a computer with the operating system Windows is required. Help can be found on following websites:

- <http://demura.net/english>
- <http://opende.sourceforge.net/doc/index.html>
- http://www.alsprogrammingresource.com/basic_ode.html
- <http://stackoverflow.com/questions/2697820/how-to-send-messages-between-c-dll-and-c-sharp-app-using-named-pipe>
- http://physxinfo.com/articles/?page_id=154

If Microsoft Visual Studio will be used to continue programming the physics engine, the software needs to be up to date. Usually it suggests some add-ons on its own. They need to be installed, if open dynamics engine should run without showing any errors. If the program

does not call for updates automatically, it should be done manually by the user. The necessary software development kit for the Windows 10 version can be downloaded on following page below:

<https://developer.microsoft.com/en-us/windows/downloads/windows-10-sdk>

In the directory of programs in Visual Studio, the directory *ode* → *build* → *vs2010* contains of several demos. For this project, only *demo_chain1.cpp* is important. All of the essential parts are in that file. Furthermore, it consists of partly original code, additionally some operations of *demo_feedback.cpp* and of course self-developed functions.

The rebar consists of several single cylinders. They are connected with hinges in the physics engine. Currently the rebar is 12 units (meters) long and consists of 120 small parts. The density of 7850 matches with the real parameters of the structural steel, which is usually used for rebars. The radius is 0.025 units. The proportions of the parameters in the physics engine are the same like in real-life. This means that the movements of the rebar should be almost correct. However, it is impossible to simply choose the correct material and the objects react realistically. The only way to simulate bodies properly is, to program some properties for them.

The position of the rebar was chosen directly in front of the observer and in the middle of the world. After the coordinates of the robot in RobotStudio could be read in, a file was used to transfer this position to the physics engine.

The rebar gives feedback in the simulation, when it is slacking. The more stress on the bodies, the darker gets the color. This code part is from the feedback tutorial. It helps to watch this sample to get a feeling, where the idea of creating the rebar came from, as it is at the moment.

The function *simLoop* runs the whole time, after pressing the start button. Even if the simulation is stopped, the visualization and its calculations continue working in the background. To pause the simulation, *CTRL + P* shall be pressed. When it is on hold, it is possible to watch single steps. With pressing *CTRL + O*, the objects move only one calculated step further. There was no information found about starting the simulation paused. This could actually be helpful in some cases.

The code already includes some inputs, which read in, when the users enters data into the terminal window. The idea was to use them to move the rebar, like objects are moved in other demos. Unfortunately, this could not be transported to this project.

Reading in the file with the robot's position in RobotStudio is only possible, if the path to the directory is chosen correctly in Visual Studio. This needs to be updated before using this function. At the moment, those coordinates are transferred in a simple text file and converted into double variables afterwards. It is a quite simple form of communication between ABB simulation software and the physics engine. But the idea was to have any working way of exchange instead of nothing. Afterwards, a server-client system is recommended, which can be used to send and receive data from both sides. This often also works with different

programming languages as it is in this project. Following link gives an example of how it works:

<http://stackoverflow.com/questions/2697820/how-to-send-messages-between-c-dll-and-c-sharp-app-using-named-pipe>

9.4.5 Add-in for RobotStudio

Developing an add-in for ABB RobotStudio has been started. A new tab with two buttons for starting and stopping the whole running process is already implemented. They do not have any functions yet. This needs to be programmed as a tool for controlling the rebars, to send information to the physics engine. It was tried to open a new window with the add-in as well, where some properties can be chosen, this did not work properly.

There is a website of ABB, where software from other developers can be found and also downloaded. It might help, if anything, that has similar functions as required, is found there. Following links leads to this site:

<https://robotapps.robotstudio.com>

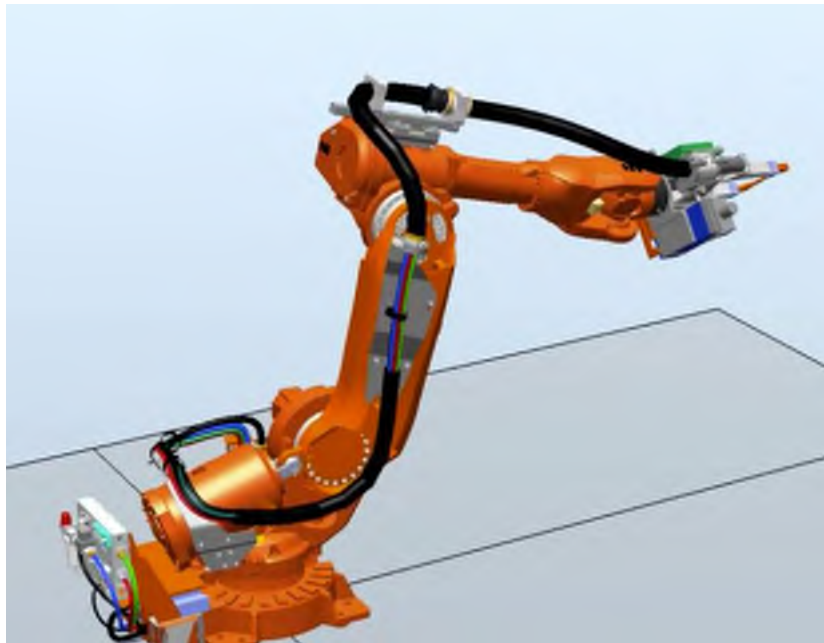


Figure 24: Screenshot of the Hose Simulator

An existing add-in, which simulates dynamical movements of hoses in RobotStudio is the *Hose Simulator* (see Figure 24). With that tool, hoses can be attached easily to any parts of the station, including robots and static surroundings. Those objects are adjusting and deforming according to their positions and the equipment around them. [18] There was no chance to get more information about the development of this tool. Nobody could tell, if and

how a physics engine has been used. Understanding the background of this add-in would help a lot for implementing a physics engine to RobotStudio for this project.

10 Test period

This part of the work includes tests of the programming code, as well as practical tests with physical rebars. This should help to get better feelings for the project's problem. On the other side, the code needs to be tested to make sure it works properly. A combination of theoretical and practical experiments would be ideal to keep working on the project attractive and interesting.

10.1 Practical tests

There were several tests planned. For example, to have a scaled down rebar, which is slacking to get a better understanding of the material's behavior. Another idea was to test gripping the reinforcing bars. This should give information to improve the gripper design on the one hand, but also to see the effects on the rebar on the other hand. They should have taken place on Mälardalens University.

Unfortunately, based lack of time, none of those practical tests have been done. There was no possibility to get visual impressions of the rebar's behavior. For this thesis, those experiments would have been a "nice to have". For the project for developing the gripper, it is more like a "need to have". Practical tests are necessary to see, if the chosen materials are working properly.

10.2 Code tests

While programming, it is necessary to build the code almost after every single change. This means that there was an ongoing testing process for the digital work. If compiling failed, changes had to be done immediately. Also if the code itself works, there is still the question about its stability. It is necessary to check, if the code works in unexpected cases as well. If not, it must have at least a warning system for the user, which informs about the sort of error. Finding out about that works, for example with "wrong" user inputs. In this project, no input by a user was needed. Therefore, a different method for finding possible mistakes had to be chosen. So the program was tested with lots of different data, which was transferred from RobotStudio to the physics engine.

10.3 Gained knowledge

Without the practical tests, there was no proof of the rebar's behavior. Only the calculations served as a help to get an idea of the movements of those steel parts. Nevertheless, there was no insurance for the correctness of their practice. So the coding part of this project was based only on the manually executed calculations. There will be some deviations between the simulation and the reality anyway, but based on missing tests, they could not be estimated.

The test phase showed especially some difficulties on sending and receiving data from RobotStudio. Writing a text file on the one and reading it out on the other side was not really easy to manage. From time to time that file was empty, while it was tried to read from the physics Engine. Reason for that case was that RobotStudio had opened the file to add new information. At the same time, the engine tried to copy the text and read it in afterwards. Simultaneously work does not work with this kind of communication system.

11 Results

After all, the main result of this master thesis is the knowledge that could be gained. Unfortunately, there is no perfectly running program, which is simulating the dynamic behavior of rebars. This was not a request of course, but the first step has been done. Robotdalen and SKANSKA of course can continue working on this field of the big project. It is impossible to ignore the dynamic movements of the rebars. They are slacking very much, so possible collisions must be avoided.

A rebar has been created with the physics engine. Moreover, it consists of several cylinders, which are connected with defined hinges. This reinforcing bar is slacking because of its dead load. Its parts change the color, when they are moving. The more stress, the darker the color gets. Green was chosen as the rebar's standard color. Furthermore, it was tried to move this reinforcing bar in the physics engine, but this did not work. The single parts were just falling apart (see Figure 25). Several ways were tried to make the object move around. Unfortunately, not even other demo programs offered code samples to help in that case.

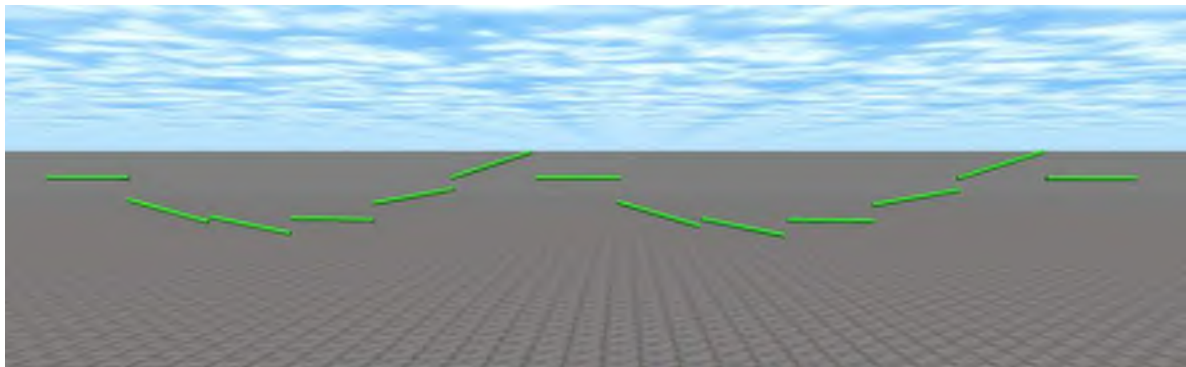


Figure 25: Rebar's pieces falling apart

However, it is not easy to develop a physics engine without any previous knowledge on that topic. A programmer, who could already gain some experience on using those engines, would probably have a better understanding of the system and how it works. The chosen physics engine is only one possible way of simulating the robot's behaviors. Open dynamics engine is nice to use because of drawstuff. It is not common for every engine to have a tool for simulations included. This one has that advantage, which makes it easier to see any changes in the program code. A commercial engine would maybe include better working functions and offer more possibilities. In addition, it was requested to use open source code for this project so far. Paying for a license for such a project will amortize probably very fast, if collisions can be avoided and the gantry will run without bit risks.

The produced add-in was only the first step. Further, it consists of two buttons. The time was not enough to develop a sub-program, which consist of functions for communicating between RobotStudio and its environment.

A simple way of communication already exists. RobotStudio is creating a text file with the position and rotation of the robot's tool center point. This is necessary for the physics engine to know, where the rebar is. Additionally, information about, how the rebar is moving, are needed, so the engine is able to calculate the dynamic behavior of the reinforcing piece.

12 Summary

As already mentioned, with this master thesis, a complete physics engine has not been created. But knowledge about that task could be gained. An add-in for RobotStudio with two buttons has been created. Also a simple way of communication between ABB's simulation software and the physics engine already exists. All these programs need to be expanded. Information about a possible approach has been collected. The first step has been made and people, who continue working on this project, receive help from this work. They can go on easily after reading this thesis.

Before this project was started, some research questions have been defined. Those will be answered in the section below.

The first questions concerned the knowledge about the rebar's behavior and what it will be used for. This master thesis could show that it is absolutely needed to collect information about the reinforcing bars to know, how and where they are moving. There slack is dangerous for the environment. The rebars are up to 12 meters long. This makes it necessary to be aware of possible damages. The robot's acceleration and speed can be adapted to influence the rebar's dynamic movements and reduce their swing.

Having a program, which is able to simulate rebar's movements, gives the opportunity to use this for other tasks as well. Moreover, the rebar's properties can be changed and different objects can be simulated afterwards. This means that it is possible to expand its usage, if other pieces may be moved by robots in the future for creating those kind of rebar cages.

Consequently, it is essentially for the programmer to use different languages because add-ins for RobotStudio are written in *C#* and physics engine usually use different ones. If it is necessary to develop anything for the robots, of course *RAPID* must be used for that. Therefore, it is useful to know more than one programming languages for this project.

The next question was about the physics engine, if it is possible to work without any engine. The answer to that is clearly "No". There is no way to have the robots working without knowing about the rebar's behavior. In conclusion it would be too dangerous because of possible collisions, if no engine is checking, how the reinforcing bars are behaving.

Additionally, to getting information about the necessity of knowledge about the rebar's movements, this thesis showed that it is impossible to implement a physics engine directly into RobotStudio without having access to its source code. It must be an external running program, communicating with ABB's simulation software. After all, it is not easy for somebody, who had never worked with such engines before, to develop a working system in just a few months. For continuing this project, it would save time, if anybody with knowledge about this topic is chosen. Getting support directly from ABB is not easy. The needed information must be found alone.

The last question, which should be answered with this thesis was, if the system will be improved by this work. Big knowledge in general about physics engines could be gained. Additionally, the program, which was developed helps to get further easier for the next person, continuing this project. Of course there is a lot of work that needs to be done. Nevertheless, the first step was done with this thesis. SKANSKA will know, how to get further now and which person should be chosen to work on that project. The requests are much clearer now, than they have been before this thesis.

13 Outlook

In conclusion, this thesis can be improved with adapting the code in Microsoft Visual Studio. The rebar is falling apart, when it was tried to move it in the physics engine. Maybe a different way should be gone to get data from RobotStudio and let this influence the rebar's position constantly. This is one very important part to have the reinforcing bars moving in the engine. Otherwise, it is not really possible to calculate their dynamic movements. Therefore, it is recommended to have somebody working on this project in the future, who already has gained knowledge about physics engines.

Moreover, the communication between RobotStudio and the physics engine must be improved as well. Sending text files is not a common and certain way to transfer data between several programs. As already mentioned, a server-client-system should be installed. Furthermore, this makes it easier to send the position continuously. It is also possible to send information back to RobotStudio. This is necessary that the robots can react on collisions or other results of the physics engines. Besides that, there are sample programs, which contain code, that can be used directly in Visual Studio, where the add-in is developed.

Having a way of communication like that between those used programs would make the requests on the add-in clearer. Data about the robots' positions could be sent easier with this sub-program in RobotStudio. Also speed is an advantage of using a server-client-system. Nevertheless, it is much faster than writing and reading a text file because the information is sent directly to the addressee.

While working on this project, Robotdalen came up with the information from ABB that they are working on a physics engine right now. They are including an engine into RobotStudio. This means that they are maybe solving the task of this master thesis at the moment anyway. An update of their software is expected soon. After all, it is not certain that it is useful for SKANSKA's project, but at least it might help getting further. Having a physics engine directly in RobotStudio makes an external program for calculations of the dynamic behaviors unnecessary. Everything could run in ABB's simulation software.

Robotdalen tried to get more information or maybe a preview on the update, but ABB didn't provide any details. Even though, those two companies are working together pretty close, nothing was told about the plans for the next version of RobotStudio. As already mentioned, it is not easy to get support from this corporation.

It is not possible to rely on the next available update for RobotStudio in the hope that it will solve the topic of this thesis. Maybe, the ABB's software development department will make a beta version available for Robotdalen before the final version is released. This would help to know, what they are working on at the moment and if it is helpful at all.

Having some practical experiments would improve the understanding for this project much more. It should be aimed to have some tests like that. Maybe it would also help to observe the worker on a construction, building a rebar cage manually.

Bibliography

- [1] Abb.com, 2015, [online]. Available:
<http://www07.abb.com/images/default-source/robotics/irb-4600-wr-1.jpg> [Accessed: 18.08.2016].
- [2] Abb.com, 2016, [online]. Available:
<http://www.abb.com/blog/gad00540/1DDE6.aspx?tag=RAPID%20programming> [Accessed: 28.07.2016].
- [3] Bauformstahl.de, 2010, [online] Available:
<https://www.bauformstahl.de/upload/publications/Bewehrungsstahl.pdf> [Accessed: 31.07.2016].
- [4] Blf-tools.com, 2016, [online]. Available:
<http://www.blf-tools.com/products/rebar-tying-machine/Rebar-Tying-Machine-blf400.html> [Accessed: 06.08.2016]
- [5] Box2d.org, 2015, [online]. Available: <http://box2d.org> [Accessed: 14.08.2016].
- [6] Bulletphysics.org, 2016, [online]. Available: <http://bulletphysics.org/wordpress/> [Accessed: 20.07.2016].
- [7] Businessdictionary.com, 2016, [online]. Available:
<http://www.businessdictionary.com/definition/simulation.html> [Accessed: 24.07.2016].
- [8] Fabricatingandmetalworking.com, 2016, [online]. Available:
<http://www.fabricatingandmetalworking.com/wp-content/uploads/2012/11/ABB-IRB-1520ID-Welding-Robot-II-rev.jpg> [Accessed: 03.08.2016].
- [9] Fascut.com, 2013, [online]. Available:
<http://www.fascut.com/rebar-benders-FR800.htm> [Accessed: 05.08.2016].
- [10] Geocentrix.2004, [online]. Available:
http://www.geocentrix.co.uk/help/content/items/steels/structural_steels.htm [Accessed: 25.05.2016]
- [11] Havok.com, 2015, [online]. Available: <http://www.havok.com> [Accessed: 15.08.2016].
- [12] I., Millington, 2007. Game Physics Engine Development. Elsevier, San Fransicso.
- [13] J., Gregory, 2009. Game Engine Architecture. A K Peters, Ltd., Natick, Massachusetts.

- [14] New.abb.com, 2016, [online]. Available:
<http://new.abb.com/products/robotics/robotstudio> [Accessed: 20.08.2016].
- [15] New.abb.com, 2016, [online]. Available:
<http://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/irb-4600> [Accessed: 27.07.2016].
- [16] New.abb.com, 2016, [online]. Available:
<http://new.abb.com/products/robotics/de/industriroboter/irb-4600> [Accessed: 27.07.2016].
- [17] Ode-wiki.org, 2014, [online]. Available:
http://ode-wiki.org/wiki/index.php?title=Main_Page [Accessed: 23.07.2016].
- [18] Robotapps.robotstudio.com, [online]. Available:
<https://robotapps.robotstudio.com/Details.aspx?fileId=9702fd3f-d223-488d-9375-055444d09c4e> [Accessed: 01.08.2016].
- [19] Robotdalen.se, 2016, [online]. Available: www.robotdalen.se [Accessed: 28.07.2016].
- [20] Tjkmachinery.us, 2015, [online]. Available: <http://www.tjkmachinery.us/tjk.htm> [Accessed: 31.07.2016].
- [21] Transportbeton.org, 2016, [online]. Available:
<http://www.transportbeton.org/baustoff/was-ist-transportbeton/> [Accessed: 03.08.2016].

List of Figures

Figure 1: Illustration of casting concrete with a crane (Source: [21])	8
Figure 2: Screenshot of the gantry in RobotStudio	9
Figure 3: Different shapes of rebars	10
Figure 4: IRB 4600 working range (Source: [1])	11
Figure 5: ABB IRB 4600 (Source: [16])	12
Figure 6: Screenshot after the first steps	14
Figure 7: Screenshot while the second step	15
Figure 8: Screenshot while step four	16
Figure 9: Screenshot while rebars are added on the bottom	17
Figure 10: Screenshot while adding type B rebars	17
Figure 11: Screenshot of the almost finished rebar cage	18
Figure 12: Gripper with a fixed rebar	21
Figure 13: Gripper straight (left) and after rotation (right)	21
Figure 14: ABB robot with welding pistol (Source: [8])	22
Figure 15: Rebar tying machine by TLF tools (Source: [4])	23
Figure 16: Bending machine by TJK Machinery, Inc. (Source:[20])	24
Figure 17: Function of bending machine (Source: [9])	24
Figure 18: Game engine reusability ([13])	29
Figure 19: Screenshot of Microsoft Visual Studio	42
Figure 20: Screenshot of RobotStudio	44
Figure 21: Overview of code transfer	46
Figure 22: A rebar before it starts moving	71
Figure 23: The moving rebar in a different color	72
Figure 24: Screenshot of the Hose Simulator	74
Figure 25: Rebar's pieces falling apart	78

List of Tables

Table 1: Length-diameter combination for rebars ([3])	10
Table 2: Criteria for choosing a physics engine	32
Table 3: Economical consideration (Risk analysis)	38
Table 4: Parameters for the calculations	39

List of Abbreviations

C	Programming language C
C++	Programming language C++
C#	Programming language C#
CCD	Continuous collision detection
CPU	Central Processing Unit
dm	decimeter
GPa	Giga Pascal = 10^9 Pascal
GPU	Graphics Processing Unit
e.g.	For example (exempli gratia)
kg	kilogram
m	meter
MDH	Mälardalens Högskola
mm	millimeter
N	Newton
Pa	Pascal = 1 N/m^2
PE	Physics Engine
PDF	Portable Document Format
PLC	Programmable Logic Controller
RS	Robot Studio
s	second
SDK	Software development kit
SI	International System of Units
TCP	Tool center point

Automated Construction- Reinforcement

Lifting Prefabricated Reinforcement Cages

Andreas Larsson
Markus Pettersson

Civil Engineering, master's level
2021

Luleå University of Technology
Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering

Title: Automated Construction-Reinforcement

Subtitle: Lifting Prefabricated Reinforcement Cages

Swedish title: Automatiserad Konstruktion-Armering

Authors: Andreas Larsson and Markus Pettersson

Year: 2021

University: Luleå University of Technology

Institution: Civil, Environmental and Natural Resources Engineering

Program: Civilingenjör Väg- och vattenbyggnad (Master: Structural Design)

Report type: Master thesis, 30 hp (Course code: X7010B)

Supervisor: Ulf Ohlsson (Luleå University of Technology) and Lars Pettersson (Skanska Sweden)

Examiner: Ulf Ohlsson (Luleå University of Technology)

Preface

With this master thesis we end our civil engineering studies at Luleå University of Technology. During these five years we have gained both friends and knowledge for life and that we are grateful for.

We would like to thank our supervisors Lars Pettersson and Ulf Ohlsson for all the help they have provided along the way and their opinions on improvements for the report. We also want to thank Lars Pettersson for introducing this subject and that you gave us the chance to do an interesting and educational job with the hope that the results may be useful.

Finally, we would like to thank Jonathan Ljung and Anders Ljunggren for their help and guidance with the analysis software LUSAS Bridge.

Stockholm, Jan 2021

Andreas Larsson

Markus Pettersson

Abstract

The construction industry is moving towards an increasingly industrial production and one step towards this is to use prefabricated rebar cages. A new concept is being tested where tied rebar cages are produced on the construction site by industrial robots. The industrial robots produce the rebar cages based on a geometric model and when finished they are lifted to the casting site with the help of a crane. In order for this concept to become an efficient process, it must already be possible to evaluate the stability of the rebar cages in the early design phase to be able to efficiently determine whether it is possible to lift the rebar cages to the casting site after production.

The scope of this thesis is to investigate what is required to create a numerical model with help of data from a geometric model in an efficient way in order to determine whether a rebar cage can be lifted.

This thesis is limited to one specific rebar cage that has already been created in the CAD-program Tekla Structures by the contractor Skanska Sweden AB. The process of what is required when creating a numerical model with data from a geometric model is limited between the analysis software LUSAS Bridge and the CAD software Tekla Structures. To be able to determine what is required in order to create a numerical model with data from a geometric model in the analysis software LUSAS Bridge in an efficient way a survey was performed. The survey includes the necessary steps to create a numerical model of a tied rebar cage from a geometric model and the problems that occurs along the way to get an efficient process.

In order to determine if the geometric model of the rebar cage is liftable a linear analysis was created in the analysis software LUSAS Bridge. The analysis was created with data from the geometric model created in Tekla Structures and with experimental results from a study where tied connection strength and stiffness were evaluated. The analysis was created to simulate a rebar cage for a bridge foundation in scale 1:2 that is lifted in four lifting points. The lifting points in this analysis is modeled as supports while the rebar cage is subjected to an acceleration force to simulate a lift. The analysis is performed in two parts, first when the tied connections have full stiffness capacity and the second part when the stiffness is decreased to be able to evaluate what happens to the stability of the rebar cage. In order to determine if the rebar cage is liftable two conditions are looked at, (1) stress in rebars and (2) forces in the joint elements.

The results from the study show that in order to create a numerical model of a tied rebar cage in an efficient way some improvements must be done in the analysis software LUSAS Bridge. The most time-consuming process when creating a numerical model of a tied rebar cage are the connections. In order to create these tied connections in an efficient way some new functions must be created in LUSAS Bridge where the software can generate different types of tied connections.

The results from the analysis show that the stress in the rebars at the lifting points is the criterion that is most critical when the rebar cage is lifted. The maximum stress reached 356 MPa with the utilization rate of 81,9% when the connection stiffness has full capacity. When the connection stiffness was adjusted, it was also shown here that the stress was the criterion that is most critical. The analysis for 50% connection stiffness capacity showed a maximum stress of 402 MPa with the utilization rate of 92,4%, this shows an increase of 10,5% of the utilization rate when the

connection stiffness is decreased with 50%. Based on these results, it can be stated that the rebar cage can be lifted if four lifting points are used. It can also be seen from the results that the stiffness in the connections has a very small impact on the behavior of the cage and therefore the placement of the rebars contributes more to the stability.

Keywords: Tied rebar cage lift, Tied connection, Connecting rebars, Finite Element Modeling, Geometric to numerical model, Integration CAD and CAE.

Sammanfattning

Byggindustrin går mot ett allt mer industriellt byggande och ett steg på vägen är att använda sig av prefabricerade armeringskorgar. Ett nytt koncept håller på att undersökas där man vill framställa najade armeringskorgar på byggarbetsplatsen med hjälp av industrirobotar.

Industrirobotarna bygger armeringskorgarna utifrån en geometrisk modell för att sedan lyftas till gjutplatsen med hjälp av en kran. För att detta koncept ska bli en effektiv process måste man redan i projekteringsfasen kunna utvärdera armeringskorgarnas lyftbarhet för att kunna avgöra om det går att lyfta armeringskorgarna till gjutplatsen efter att de är färdigmonterade.

Examensarbetets syfte är att undersöka vad som krävs för att ska skapa en numerisk modell med hjälp av data från en geometrisk modell på ett effektivt sätt för att sedan kunna avgöra om en armeringskorg går att lyfta.

Denna studie är avgränsad till enbart en typ av armeringskorg som redan är skapad i CAD-programmet Tekla Structures av entreprenören Skanska Sverige AB. Processen som krävs för att skapa en numerisk modell med hjälp av en geometrisk modell är begränsad till analysprogrammet LUSAS Bridge och CAD-programmet Tekla Structures.

För att kunna avgöra vad som krävs för att skapa en numerisk modell med hjälp av en geometrisk modell i analysprogrammet LUSAS Bridge utfördes en kartläggning. Kartläggningen omfattar de steg som krävs för att skapa en numerisk modell av en najad armeringskorg från en geometrisk modell och de svårigheter som finns längs vägen.

För att kunna avgöra om den geometriska modellen av armeringskorgen är lyftbar skapades en linjär Finita Element Analys i analysprogrammet LUSAS Bridge. Analysen är skapad med hjälp av data från den geometriska modellen från Tekla Structures samt testresultat från en tidigare studie där man har provat hållfastheten och styvheten hos najade knutpunkter. Analysen är skapad för att efterlikna en armeringskorg till ett brofundament i skala 1:2 som lyfts i fyra punkter. Lyftpunkterna i denna analys är simulerade som stöd medan armeringskorgen utsätts för en accelerationskraft för att efterlikna ett lyft. Analysen utförs i två delar, en när de najade knutpunkterna har full styvhet och den andra när styvhet för knutpunkterna minskar. Detta för att se hur styvheten i knutpunkterna påverkar stabiliteten i armeringskorgen. Armeringskorgens lyftbarhet bedöms av två olika kriterier (1) spänning i armeringsjärnen och (2) krafter i knutpunkterna.

Resultaten från studien visar att för att kunna skapa en numeriskmodell av en najad armeringskorg på ett effektivt sätt måste en del förbättringar göras i analysprogrammet LUSAS Bridge. Den process som är mest tidskrävande är när man skapar de najade knutpunkterna för armeringskorgen. För att det ska gå att genomföra detta på ett effektivt sätt måste en ny funktion skapas i LUSAS Bridge där programmet kan generera olika typer av knutpunkter automatiskt.

Resultaten från analysen visade att spänningen av armeringsjärnen vid lyftpunkterna är det kriterium som är mest kritisk när armeringskorgen utsätts för lyft. Den maximala spänningen uppgick till 356 MPa med en utnyttjandegrad på 81,9% för armeringskorgen med full styvhet. När styvheten justerades visades det även här att spänningen är det kriterium som är mest kritiskt. Analysen för 50% styvhet visade en maximal spänning på 402 MPa med en utnyttjande grad på 92,4%, detta visar en ökning på 10,5% av utnyttjandegraden när styvheten halveras.

Utifrån dessa resultat kan man konstatera att armeringskorgen går att lyfta om man använder fyra lyftpunkter. Man kan även utifrån resultaten se att en minskning av styvheten i knutpunkterna har en liten påverkar på armeringskorgens lyftbarhet och istället är det placeringen av armeringsjärnen som har störst betydelse.

Nyckelord: Lyft av najad armeringskorg, Najad knutpunkt, Sammanfogning av armering, Finita Element modellering, Geometrisk till numeriskmodell, Integration mellan CAD och CAE.

Table of content

<i>Preface</i>	<i>II</i>
<i>Abstract</i>	<i>III</i>
<i>Sammanfattning</i>	<i>V</i>
<i>Notations</i>	<i>XI</i>
<i>1 Introduction</i>	<i>1</i>
1.1 Background and research motivation	1
1.2 Aim and scope.....	3
1.3 Limitations	4
1.4 Allocation of responsibility between authors	4
1.5 Outline of thesis	5
<i>2 Literature studies</i>	<i>6</i>
2.1 Joining of rebars	6
2.1.1 Tying with steel wire	6
2.1.2 Welding	8
2.1.3 Earlier research	8
2.2 Integration of Computer Aided Design and Computer Aided Engineering	9
2.2.1 Introduction	9
2.2.2 Problems with CAD and CAE	9
2.3 Finite Element Modeling.....	11
2.3.1 Element types.....	12
2.3.2 Mesh.....	13
2.3.3 Earlier Research	13
<i>3 Method</i>	<i>16</i>
<i>4 Finite Element Modeling of rebar cage</i>	<i>17</i>
4.1.1 Geometry and material data	17
4.1.2 Modeling technique	19
4.1.3 Connections.....	20
4.1.4 Supports and loading	30
4.1.5 Analysis	32
4.1.6 Verification of total load	32
<i>5 Result</i>	<i>33</i>
5.1 CAD and CAE survey	33
5.1.1 Problem areas in the process of creating a numerical model	34

5.2	Verification of reaction forces in FEM-model	40
5.3	Finite Element Analysis.....	40
5.3.1	Maximum deformations	40
5.3.2	Maximum stress in rebars.....	41
5.3.3	Maximum forces in joint elements.....	41
5.4	Sensitivity Analysis.....	42
5.4.1	Maximum deformations	42
5.4.2	Maximum stress in rebars.....	43
5.4.3	Maximum force in joint elements.....	43
6	<i>Analysis.....</i>	49
6.1	The general integration problems between Tekla and LUSAS.....	49
6.1.1	Geometry.....	49
6.1.2	Material and Cross section	53
6.1.3	Connections.....	54
6.1.4	Load case and support.....	59
6.2	Finite Element- and Sensitivity- Analysis	59
6.2.1	Deformations for the rebar cage.....	59
6.2.2	Maximum stress for the rebar cage.....	59
6.2.3	Maximum force in joint elements.....	60
7	<i>Discussion and conclusions</i>	64
7.1	Discussion	64
7.2	Conclusions.....	66
8	<i>Suggestions on further research.....</i>	68
9	<i>Reference.....</i>	69
	<i>Appendix A: LUSAS results full connection stiffness.....</i>	1
	<i>Appendix B: LUSAS results sensitivity analysis</i>	6

List of figures:

Figure 1 Visualization of a robotic cell for prefabrication of rebar cages by Relefors, et al. (2019)	1
Figure 2 Visualization of the concept on site. 300: is a crane, 100: is the rebar cage in final position ready for casting, 200: is the casting site, 500: is the placement of the robot-cell, 700: control unit for reinforcement (United states Patentnr 0157664, 2017).	2
Figure 3 Example of a power-driven tie wire gun and an example of the result when the tie wire gun is used (Kettil, 2012).	6
Figure 4 Example of tie wires and tying tools (Altobelli, 1991)	7
Figure 5 Example of different types of tie wire types used in the field (The Aberdeen Group, 1984)	8
Figure 6 Illustration of a beam element and the number of degrees of freedom (LUSAS, 2019)	12
Figure 7 Illustration of a joint element for beams and the number of degrees of freedom (LUSAS, 2019).	13
Figure 8 Concept used in earlier studies for modeling a connection in Finite Element Analysis (C Builes Mejia, 2010)	14
Figure 9 Different rebar shapes used to construct the rebar cage (BE GROUP, 2021).	17
Figure 10 Geometry of rebar cage from the software LUSAS Bridge	18
Figure 11 Stress and strain curve for hot rolled steel (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004)	19
Figure 12 Translational direction for connections in Δx , Δy and Δz	21
Figure 13 Rotational direction for connections in θx , θy and θz	21
Figure 14, Illustration of connection type A in reality	22
Figure 15 Illustration of a connection type A with joint element (K) and local coordinates (u, v, w)	22
Figure 16, Illustration of connection type B in reality	24
Figure 17 Illustration of a connection type B with joint elements (K1, K2 and K3) and local coordinates (u, v, w)	24
Figure 18, Illustration of connection type C in reality	27
Figure 19 Illustration of a connection type C with joint elements (K1-K8) and local coordinates (u, v, w)	27
Figure 20 Moment distribution along the long edge of the rebar cage if supports (lifting points) are place 1,02m from the edges.	31
Figure 21 An overview of the rebar cage with the positions for the supports that symbolize lifting points	31
Figure 22 Workflow showing the steps creating a numerical model with data from geometrical model.	33
Figure 23 Cross-section and material properties integration issues between Tekla and LUSAS	34
Figure 24 Geometry integration issues between Tekla and LUSAS	35
Figure 25 Visualization of B/C-bars and the way they are described by coordinates in Tekla	36
Figure 26 Issues while modeling connections in LUSAS	37
Figure 27, Workflow for assigning load case and support in the Finite Element Model	38
Figure 28 The rebar cage showed with contours of maximum deformation in vertical direction	40

Figure 29 Rebar cage showed with contours of stress σ_{sx} showing the rebars with the highest stress values	41
Figure 30 Rebar cage showed with contours of maximum force F_x in joint elements	42
Figure 31 Change of maximum deformation for the rebar cage with different stiffness capacity	42
Figure 32 Change of maximum stress ($\sigma_{sx}(F_x, M_y, M_z)$) for rebars at the lifting point with different stiffness capacity.....	43
Figure 33 Change of force in joint element $KA1$	44
Figure 34 Change of moment in joint element $KA1$	44
Figure 35 Change of force in joint element $KB1,2$	45
Figure 36 Change of moment in joint element $KB1,2$	45
Figure 37 Change of force in joint element $KB3$	46
Figure 38 Change of force in joint element $KC1,2,6,7$	46
Figure 39 Change of moment in joint element $KC1,2,6,7$	47
Figure 40 Change of force in joint element $KC3,8$	47
Figure 41 Change of force in joint element $KC4,5$	48
Figure 42 Improved process to create geometry in LUSAS with data from Tekla.....	50
Figure 43 Workflow for processing the coordinates	51
Figure 44, Processing of B-bar coordinates	52
Figure 45, Processing of C-bar coordinates.....	52
Figure 46, How the rebars are created with beam elements and nodes	53
Figure 47 Improved process to model connections in an rebar cage	55
Figure 48 Suggestions on how to improve the mesh-function in LUSAS.....	56
Figure 49 Suggestion on how to assign material properties for different connection types.	58
Figure 50 Utilization summary of connection strength for the type A connection with the highest load at each connection stiffness.....	61
Figure 51 Utilization summary of connection strength for the type B connection with the highest load at each connection stiffness.....	62
Figure 52 Utilization summary of connection strength for the type C connection with the highest load at each connection stiffness.....	62

Notations

Latin capital letters

		[Unit]
F_x	Force in local x-direction for a joint element	[N]
F_y	Force in local y-direction for a joint element	[N]
F_z	Force in local z-direction for a joint element	[N]
$F_{x,Rd}$	Snap tie connection design strength in x-direction	[N]
$F_{y,Rd}$	Snap tie connection design strength in y-direction	[N]
$F_{z,Rd}$	Snap tie connection design strength in z-direction	[N]
$F_{x,Ed}$	Force acting in a snap tie connection in local x-direction	[N]
$F_{y,Ed}$	Force acting in a snap tie connection in local y-direction	[N]
$F_{z,Ed}$	Force acting in a snap tie connection in local z-direction	[N]
$M_{x,Ed}$	Moment in local x-direction for a joint element	[Nm]
$M_{x,Rd}$	Moment capacity for a single snap tie	[Nm]
E_{sd}	Young's modulus for reinforcement	[MPa]
K	Local joint element stiffness	[-]
K_s	Global connection stiffness	[-]
CAD	Computer Aided Design	[-]
CAE	Computer Aided Engineering	[-]
FEM	Finite Element Method	[-]
FEA	Finite Element Analysis	[-]

Latin lowercase

k_x	Translational stiffness in x-direction for a single snap tie	[N/m]
k_y	Translational stiffness in y-direction for a single snap tie	[N/m]
k_z	Translational stiffness in z-direction for a single snap tie	[N/m]
$k_{\theta x}$	Rotational stiffness in x-direction for a single snap tie	[Nm/rad]
$k_{\theta y}$	Rotational stiffness in y-direction for a single snap tie	[Nm/rad]
$k_{\theta z}$	Rotational stiffness in z-direction for a single snap tie	[Nm/rad]
f_y	Yield strength for rebars	[MPa]
f_{yk}	Characteristic yield strength for rebars	[MPa]
f_{yd}	Design yield strength for rebars	[MPa]
k_s	Connection stiffness	[-]
u	Local direction x for a joint element	[-]
v	Local direction y for a joint element	[-]
w	Local direction z for a joint element	[-]
dz	Deformation in z-direction	[mm]
dx	Deformation in x-direction	[mm]
dy	Deformation in y-direction	[mm]

Greek lowercase

$\emptyset$	Diameter for rebars	[mm]
ν	Poisson's ratio	[-]
γ_s	Partial coefficient safety factor	[-]
ε_s	Strain for reinforcement	[-]
σ_{sx}	Stress for reinforcement	[MPa]

1 Introduction

1.1 Background and research motivation

The construction industry is far behind other industries when you look at automation with robots. One of the reasons for this is that most of the construction projects are one-of-a-kind projects (Relefors, o.a., 2019). According to Relefors et al. (2019) it is possible for the construction industry to gain many positive effects of robotic automation, for example reduced cost, efficiency and increased safety. One advantage that is investigated is the possibilities for the construction industry to gain positive effects from robots that are able to build rebar cages directly on the construction site.

Dolinsek & Duhovnik (1998) investigated if rebar cages for beams and columns could be prefabricated by a robot-cell as a part of the automation. The solution that was investigated was that robots attached to a portal frame assemble the rebar cage by placing the all ready bent rebars and then weld them in to position (Dolinsek & Duhovnik, 1998). Simulations on a similar system has been made with ABB RobotStudio by Relefors et al. (2019). The simulations were done with 3 robots hanging up side down and fabricated the rebar cage by tying the rebars together as shown in Figure 1.

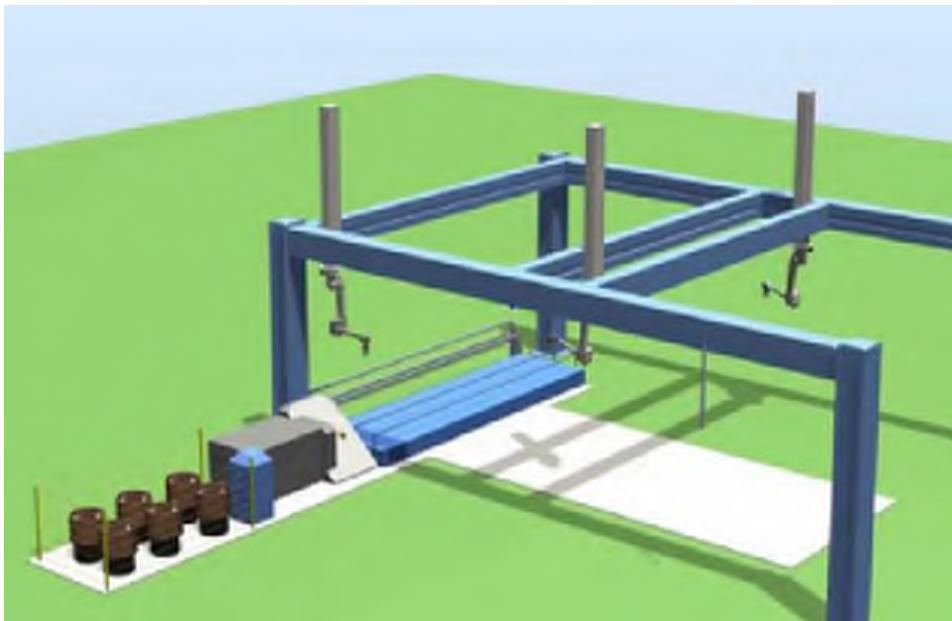


Figure 1 Visualization of a robotic cell for prefabrication of rebar cages by Relefors, et al. (2019)

The robot-cell is supposed to be directly placed on the construction site. The reinforcement is delivered to site on coils and then straightened out and cut to the right length and formed to the right shape. This is done for each bar right before the robots tie them together. When the rebar cage is assembled it will be lifted to its final position shown in Figure 2.

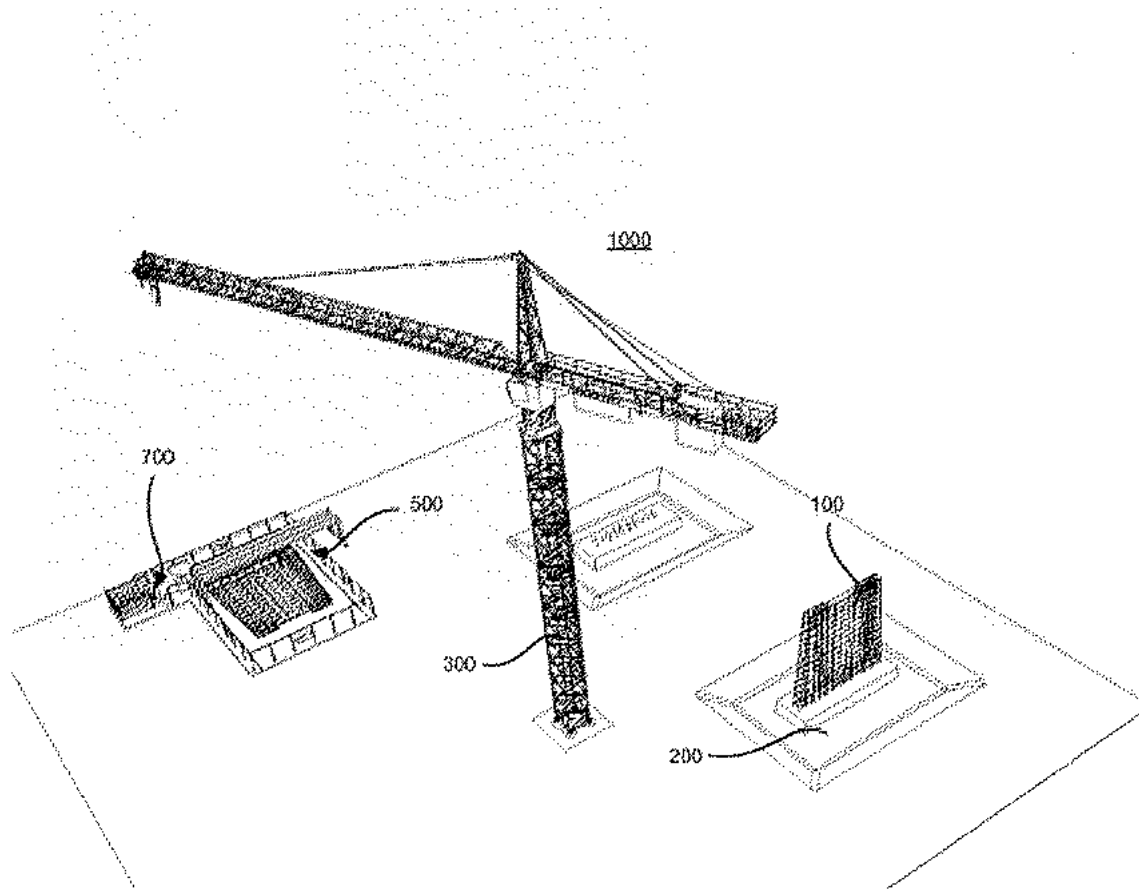


Figure 2 Visualization of the concept on site. 300: is a crane, 100: is the rebar cage in final position ready for casting, 200: is the casting site, 500: is the placement of the robot-cell, 700: control unit for reinforcement (United states Patentnr 0157664, 2017).

The rebars are only tied together to maintain their position during the actual casting of the concrete. Hence there is no specific code of how the actual tying should be performed or how strong it should be. The strength of the ties has not been essential due to this reason but for this concept the strength of the tied connections is crucial to know so that the rebar cage does not get permanent deformations or collapse when it is lifted.

The capacity of the rebar cage needs to be checked in the early stage of the design process. The main purpose of the concept is to create a process that will generate advantages on site without generating additional work for the engineer in the early design process. Therefore, the analysis process for the design engineer needs to be efficient and if it is not the concept loses its purpose. For the analysis to be efficient, the geometrical and numerical model should have a functional integration. The contractor, in this case Skanska Sweden AB, is using Tekla Structures for design and LUSAS for structural analysis. The engineer should in an easy way be able to create a numerical model from the geometric model, to check if it is possible to lift the rebar cage, for the concept to fulfill its purpose.

1.2 *Aim and scope*

The aim of this study is to complement the concept described in chapter 1.1 to determine if the rebar cage is liftable without generating additional work in the early design process. The study is also investigating if it is possible to lift the rebar cage with tie wire connections and how it should be done. This is a theoretical study and therefore a numerical model was created in the analysis software LUSAS Bridge and the analysis was carried out using the Finite Element Method. The numerical analysis helped to evaluate the stability of the rebar cage when it is influenced by a lifting force and in that way made it possible to determine how the rebar cage should be lifted. This study aims to answer the following questions:

- (a) How could a numerical model in a structural design software be created with help from a geometrical model?
- (b) How should the tie wire connections be modelled with help from the geometrical model and how does the stiffness of the connections affect the behavior of the rebar cage?
- (c) Based on the Finite Element Analysis, is it possible to lift the rebar cage and if so, how should it be done?

This study will make it possible to determine if it is possible to lift the rebar cage and specify how this process should work in early design phase without additional work. The concept should be used in the early design phase when the rebar structures are designed, to be able to decide if the rebar structure need some modifications in order to lift it from the assembly line. This rebar cage is currently being constructed in scale 1:2 for another research project at the contractor Skanska Sweden in Stockholm. This study will help this other research project in the future when it is time to lift the rebar cage. The study will also generate data for further work on the concept and suggestions for improving the integration between Tekla structures and LUSAS bridge plus.

1.3 Limitations

The calculations and modelling will be carried out on one specific rebar cage which has been created in the software Tekla Structures by Skanska Sweden AB.

Only one type of tie wire connection will be analyzed and modelled, the connections will be modelled as semi-rigid with the stiffnesses taken from tests from earlier research.

The rebars will be modelled as beam elements and not volumes and the numerical analysis of the rebar cage is carried out with linear analysis.

This study is limited by the integration between the analysis software LUSAS bridge and Tekla structures.

The stiffness values for the connections in this study are extracted from earlier research which investigated tie wire connections made by hand and not by a power-driven tie wire gun. The test was carried out on a connection containing two rebars that was tied together. Hence the stiffness value is assumed to be the same even if more than two rebars are tied together in the same connection, and the design strength for the connections is assumed to be the same even if the stiffness capacity in the connection is less than 100%.

In order to evaluate if the rebar cage can be lifted, only the following criteria's are considered, (1) stress levels in rebars and (2) the forces in the joint elements.

1.4 Allocation of responsibility between authors

This master thesis comprehends 2x30 credits and since was carried out by two students the responsibility has been divided. However, several parts of this master thesis have been conducted by both students due to practical reasons. The parts that have been conducted by both students are the following: the literature study, research of the behavior of tie wire connection.

The work has been divided as following:

Andreas Larsson

- Modeling of tie wire connections and theory of the behavior.
- Finite Element modeling in LUSAS bridge plus
- Analysis of the results from Finite element analysis

Markus Pettersson

- Survey of integration between Tekla and LUSAS
- Analysis of recommendations for integration between Tekla and LUSAS

1.5 Outline of thesis

Chapter one – Presents background and research motivation, aim and scope, limitations, allocation of responsibility between authors and outline of thesis.

Chapter two – Presents the literature study which contains information about connecting rebars, integration between Computer Aided Design and Computer Aided Engineering and Finite Element Modeling. This chapter also contains earlier research about the stability in tied rebar cages.

Chapter three – Contains the method. This chapter explains the method and approach used to achieve the goal of this study.

Chapter four – Describes in detail how the Finite Element Model is built.

Chapter five – This chapter contains the current results from the survey regarding what is required to create a numerical model from a geometric model. This chapter also contains the current results from the Finite Element Analysis regarding the stability of the rebar cage during lifting.

Chapter six – Contains the analysis of the results from the survey and suggestions are made on how to solve some of the problems when a numerical model of a rebar cage is created from a geometric model. This chapter also contains an analysis of the results from the Finite Element Analysis of the rebar cage in order to decide if the rebar cage is liftable and to see how the connection stiffness affects the rebar cage.

Chapter seven – Contains the discussion about the results and analysis and the conclusions drawn from this.

Chapter eight – Presents suggestions on further research.

Appendix A: LUSAS results full connection stiffness – Contains a full report for the Finite Element Analysis regarding the rebar cage with full capacity in the tie wire connections from LUSAS bridge with more results shown as contours.

Appendix B: LUSAS results sensitivity analysis – Contains the results for the sensitivity analysis from LUSAS bridge.

2 Literature studies

2.1 Joining of rebars

The method of joining rebars has no contribution for the strength of the finished concrete structure. The main reason of joining the rebars together is to maintain the placement of the bars for different trades to do their work and during casting of the concrete. Due to this there is no need to connect the bars in every intersection.

The most common methods of joining the rebars together are tying by using steel wire and by welding. There are also other methods to join rebars together by using mechanical anchoring and plastic clips (Kettil, 2012). In section 2.1.1-2.1.2 the two most common techniques are described.

2.1.1 Tying with steel wire

Tying rebars by using a steel wire is the most common method used out in the field due to its fast but also for its simplicity and low price, another advantage is that this method has no negative effect on the steel like welding has on it (Kettil, 2012).

When joining rebars together with steel wire there is different techniques and tools that are used. You can either use a coiled wire that is twisted around the bars with a wire clipper or a wire called double loop tie wire that is twisted around the bars using a spring return tying tool or a hand tying tool. Nowadays there is a large supply of power-driven tying guns on the market and they work similar to when it is done by hand (Kettil, 2012). The wire that is commonly used when tying rebars together is an annealed steel wire with a thickness of 1-2mm (Sandberg & Hjort, 1996). Figure 3 Shows an example of a tie wire gun and the knot created by it. Figure 4 shows different tie wires and tools that are used in the field.



Figure 3 Example of a power-driven tie wire gun and an example of the result when the tie wire gun is used (Kettil, 2012)

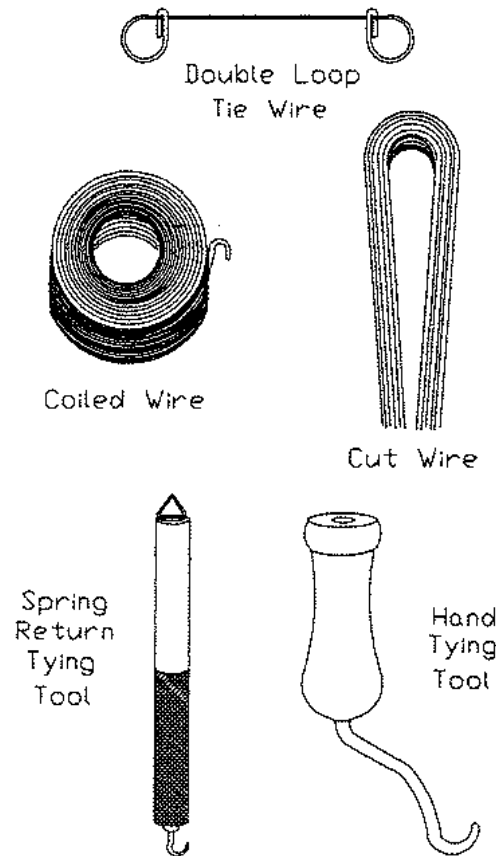


Figure 4 Example of tie wires and tying tools (Altobelli, 1991)

There are different variations of the tying techniques, a snap or single tie is often used in flat horizontal work, it can also be carried out using double wire and is then called a double snap tie. For wall reinforcement the wrap and snap tie is used to secure the positioning of the bars and to prevent the horizontal reinforcement to move while trades do their work. Another common tie is the saddle or U tie which is often used to secure the column stirrups ties to the vertical bars. To secure heavier objects, the wrap and saddle tie is used, it is a variation of the saddle tie but is wrapped 1,5 times around the first bar (The Aberdeen Group, 1984). The different kinds of tying techniques are showed in Figure 5.

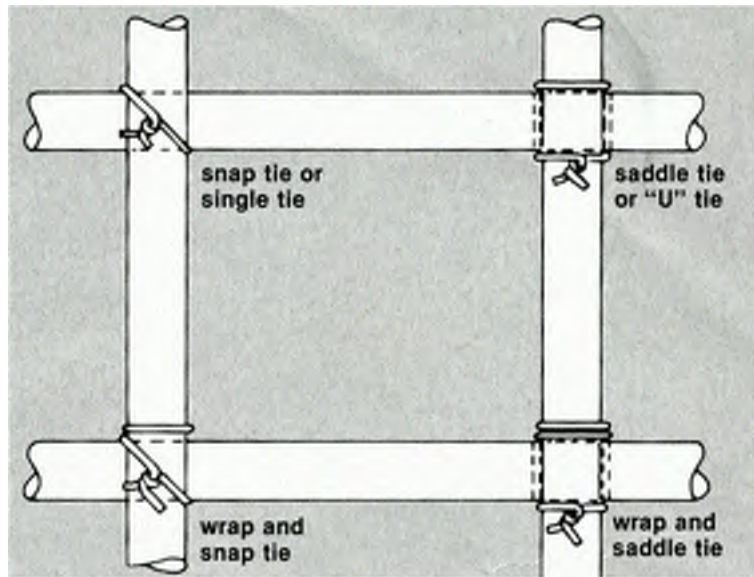


Figure 5 Example of different types of tie wire types used in the field (The Aberdeen Group, 1984)

One of the problems with the method of tying with steel wire is that the intersection points do not get enough rigid, and this is a problem during transportation and lifting of the steel structures (Kettil, 2012). This method is often performed by hand and can be very demanding for the workers. To ease the workload for the reinforcement ironworkers' other methods has been developed such as handheld machines that do the tying and, as in this study, an industrial robot that it is performing all that work.

2.1.2 Welding

Instead of tying the rebar-intersections with steel wires, welds can be used. This method makes the rebar intersections stiffer and can be seen as rigid which makes it possible to lift the rebar structures and it will withstand transportations better. This method is often used when the rebar cages are prefabricated due to the possibility of using industrial welding robots in a controlled environment. One problem with welding is that it needs to be done in a controlled environment which can be difficult on the work site during bad weather (Kettil, 2012).

Welding is performed during extreme heat which melts the steel parts. Later when the melted steel stiffens, its properties has changed around the affected area, the so-called Heat Affected Zones. In these areas the material structure will change and make it more porous than it is outside these areas. This will lead to tensile problems, the ability to handle microscopic cracking in the material which is a problem during fatigue loading (Śloderbach & Pajak, 2015). Bridges and tunnels are fatigue prone structures that are exposed to cyclic loading and because of their long design life is exposed to a high amount of stress cycles. Hence welded rebar cages are not recommended for bridges (Kjellgren, 2019).

2.1.3 Earlier research

In 2018 Devine et al. (2018) wrote a paper where the main goal was to investigate the changes in rebar spacing during transportation and final placement of a prefabricated rebar assemblies. But

this paper focus on the effects when lifting prefabricated rebar cages from horizontal to vertical position, so called tripping. This study was conducted on two different kind of prefabricated rebar structures and thirteen specimens, one structure was a 2D rebar mat and the other one was a 3D rebar cage. The rebar assemblies were constructed in a laboratory by professional reinforcement ironworkers using steel wire to connect the rebars. Some of the specimens had a variation of the number of ties, reinforcement layers and bracing, this to see how the different setups affected the changes in the rebar placements. The observations were monitored during the tripping phase. To monitor the relative movements between the rebars, a 3D digital image correlation (3D-DIC) was used and compared to industry standards for rebar placements tolerance. Several tracking points was placed on selected bars, two tracking points were used per chosen intersection. The conclusions of the study are the following: Diagonal bracing is recommended because its more effective rather than increasing the number of tied intersections in order to prevent the rebars to move. The number of rebar layers do not have any major effect on the space changing of the rebars and neither do the dimension of the rebar cages.

2.2 Integration of Computer Aided Design and Computer Aided Engineering

2.2.1 Introduction

Computer Aided Design (CAD) and Computer Aided Engineering (CAE) are two completely different disciplines and therefore they need different shape models as representation. CAD is an umbrella term for visualization tools meanwhile CAE is an umbrella term for tools analyzing different structural elements using FEM-Finite Element Method. Due to this, models created in CAD are unsuitable for the Finite Element Analysis (FEA) (Hamri, Léon, Giannini, & Falcidieno, 2010). FEA is to find approximate solutions of partial differential equations and integral equations using numerical techniques. This method consists in discretization of a complex model into small elements. The application of the mathematical techniques usually requires a parameterized FEA model, this means that model geometry, loads, material properties and other mechanical and physical features are described in parameters that represents variables in mathematical expressions (Fedorik, Heikkilä, & Makkonen, 2016). For example, a CAD model uses volumes or bodies to describe an object such as a beam with two flanges and one web. For the FEA program using beam elements, the only importance is the centerline of the beam and its cross-sectional properties, elements, materials, supports, degrees of freedom (DOFs) and loads, to be able to carry out the analysis (Olivier, Beucke, Firmenich, & Cornelis van Rooyen, 2006).

2.2.2 Problems with CAD and CAE

Today there are some CAD/CAE software's that are integrated. These programs save a lot of time for the engineer, but these programs are often lacking calculation power and are limited to linear problems. To be able to solve non-linear problems a standalone Finite Element program is needed (Roith, Troll, & Rieg, 2007). Park & Dang (2010) addresses the problem between integration of CAD and CAE software. They use common scripting, program language and Application Programming Interface (API) to perform the integration between commercial CAD-CAE. This process computes a loop to optimize the design automatically without interaction of a designer.

Another attempt to bridge the gap between CAD and CAE is presented in Lee (2004) who presents a new approach called CAD/CAE-integrated approach which uses a feature-based non manifold modelling system. This system uses one single master model which contains all of the geometric models needed for CAD and CAE. With this approach all creations and changes are done in one model and later imported to the CAD/CAE softwares. In this way both types of models are allways up to date. Something similar has been done by Gujarathi & Ma (2010). Instead of using one master model they suggest a method that uses a Common Data Model (CDM) which contains all the parametric information that both the CAD and CAE models need. The CDM works similar to the master model in such a way that when the CDM is modified it is reflected directly in the CAD and CAE models.

Since CAD and CAE uses different shape model representations they are unsuitable for eachother. Hamri et al. (2010) presents a new approach to solve this problem. Their approach is based on a new shape representation called mixed shape representation which supports both the B-Rep and polyhedral models and creates a link between the CAD and CAE models. Boundary representation (B-Rep) is method used to represent shapes by defining it with limits or borders meanwhile polyhedral is used to describe a shape in small elements in order for the CAE software to do the analysis of the object. Both the B-Rep and polyhedral are kept on the same topology support called High Level Topology (HLT). The HLT is a shared requierment to be able to prepare the FE-Model. In order to drive FEM from complex CAD models fast and simply as possible Cuikrière & Francois (2014) presents a new data structure called Unified Topological Model (UTM). The UTM allows modelling structures with mixed solid, shell and beam geometry due to that B-Rep basic standards has been extended.

One of the problems of using a CAD model for the FEA is that the CAD model often features a large amount of details and different faces that are smaller than the FE mesh size. This configuration will not only lead to increased analysis time but also poor results in the simulation. Therefore, there is a need to simplify the CAD model and make some hypotheses of how the structure will work to be able to get a good result (Foucault, et al. 2008). This process is very time consuming and every time the CAD model is modified this process needs to be repeated. According to Arabshahi & Barton (1991) there has been attempts to reduce the amout of work that is needed to simplify the model for the FEA using neutral formats such as IGES (Initial Graphics Exchange Specification) or direct interfacing to tranfer data between CAD systems. Using this type of format often leads to a lot of unnecessary data for the FEA and will be ignored in the end. Even in integrated programs the whole model is seldom modelled and in the end the engineer often thinks it is easier to build a simplified model from scratch (Arabshahi & Barton, 1991).

In the early studies of integration of CAD and CAE Arabshahi & Barton (1991) investigated which tasks are complex and time-consuming for an engineer when creating a FEA. Some of the tasks that need to be solved in order to rapitly create a FEA model is detail removal, shape idealization and meshing. To improve the effecency of the preprocessing of the FEM Lèon & Fine (2005) creates an appropriate geometric model based on polyhedrals and a set of geometric

operators. This enables skin and detail removal, topological changes, dimensional reduction and shape changes.

Foucault et al. (2008) discusses the challenges of creating a FE model from a design model which often contains poorly-shaped elements which leads to poor mesh results. To solve this problem, they propose a model called Mesh Constraint Topology (MCT) that cleans up the models poorly-shaped elements and creates elements that can generate a better mesh result. Armstrong (1993) presents some methods for geometric modelling tools such as medial-axis and medial-surface transformations to obtain information about object shape which could be difficult to get from other sources in order to simplify the model. By using automatically meshing for solid modelling systems it can easily create meshes that need a lot of computer power.

According to Donaghy et al. (1996) there is more efficient to use simpler shell or beam models instead of solid models filled with elements when looking at the structural behaviour. In their paper they describe a set of procedures to be able to approximate a 2D plate or 3D shell structure. For a quick, linear static analysis, they use dimensional reduction with methods for automate these procedures using Medial Axis Transform (MAT). In order to speed up the process of getting a CAD model ready for FEA Shawn et al. (2014) use enriched digital mock-ups (DMUs). These components has been enhanced with some functional information that will be linked to the structural model in order to speed up the whole process of creating a FEA.

2.3 *Finite Element Modeling*

The Finite Element calculations can be split into three different steps. Where the first step is domain meshing where the object or the model that you are analyzing is split into several elements and every element is represented by nodes and edges. The second step for the Finite Element calculations is often referred to as displacement approximations. To form equations for the calculations a local coordinate system is used. Each element in the mesh has its own local coordinate system which is limited to the geometry of the element. By using local coordinate its possible to interpolate the displacement within each element and calculate the displacement for each node in the element. The final main step is to formulate the Finite Element equations. Theses equations are formed for each element with the Hamilton principle in the local coordinate system for each element. Because the model is split into many elements each with its own equations based on the local coordinate system. A transformation to the global coordinate system is made to define each equation on the global coordinate system. Then all the equations for each element are assembled to create a global equation system for the model (Augusta, et al. 2015).

In the Finite Element Analysis, it is possible to use different beam theories in the calculations. First order beam theory is Euler-Bernoulli theory, this theory assumes that the displacement caused by the shear force in an element is zero and the rotational inertia, defines the torque needed to rotate the element about a given axis, is ignored to simplify the calculations. Timoshenko beam theory is another theory that is based on Euler-Bernoulli and Rayleigh

theory but where the displacement caused by shear force also is taken to account in the calculations. (Labuschagne, van Rensburg, & van der Merwe, 2009).

The model is built up with different element types and the most common ones when you modeling structures is beam, shell and solid elements. A beam element is a one-dimension line element which has a given cross section. These types of elements can have up to six degrees of freedom and are common when modeling beams (Eugenio, 2013). Shell elements is a two-dimension element that has a given thickness. These elements can also be modeled with six degrees of freedom (Liu & Quek, 2003). The solid element type is a volume with three dimensions and all nodes in the volume has 3 degrees of freedom. These types of elements require more computer power because of the number of nodes generated in the volume (Eugenio, 2013).

2.3.1 Element types

In order to perform an analysis, element types need to be assigned to the different components. Depending on the choice of the element type different theories are applied to solve the mathematical problems in the analysis. In the commercial Finite Element Analysis software LUSAS there are 14 types of element groups: bar, beam, 2D continuum and 3D continuum, joint and rigid elements etc. In this study two different elements are used in order to perform an analysis on the rebar cage. The elements that are used in this study are beam elements and joint elements. LUSAS (2019) describes the two elements in this way:

“Beam elements are used to model plane frames, space frame structures, and cables in cable-stayed structures” (LUSAS (2019), s. 7). Here you can use thick or thin beam theory and beam elements can model axial force, bending and torsional behavior. Thick beam uses Timoshenko beam theory and includes shear deformations meanwhile thin beams uses Kirchhoff theory and exclude shear deformations (LUSAS, 2019).

3D Thick Beam Elements

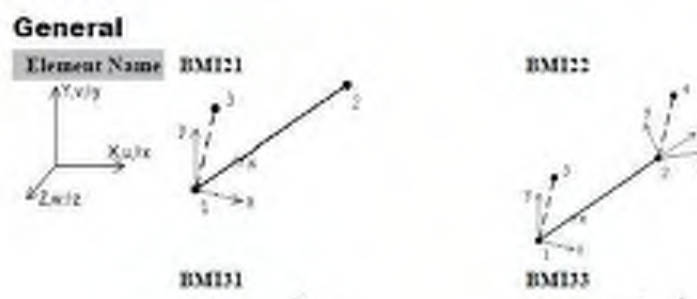


Figure 6 Illustration of a beam element and the number of degrees of freedom (LUSAS, 2019)

“Joint elements are used to model flexible joints between other LUSAS elements” (LUSAS, 2019, s.9) These joint elements are designed to match the nodal freedoms of their associated elements. By using a 3D joint element between two nodes it creates six springs in the local x-, y- and z-directions and it has the following degrees of freedom: u , v , w , θ_x , θ_y , θ_z at nodes 1

and 2. Where u , v and w are translational degrees of freedom and θ_x , θ_y , θ_z are rotational degrees of freedom in x -, y - and z -direction. By creating a joint element of this type, you can simulate a semi-rigid connection (LUSAS, 2019).

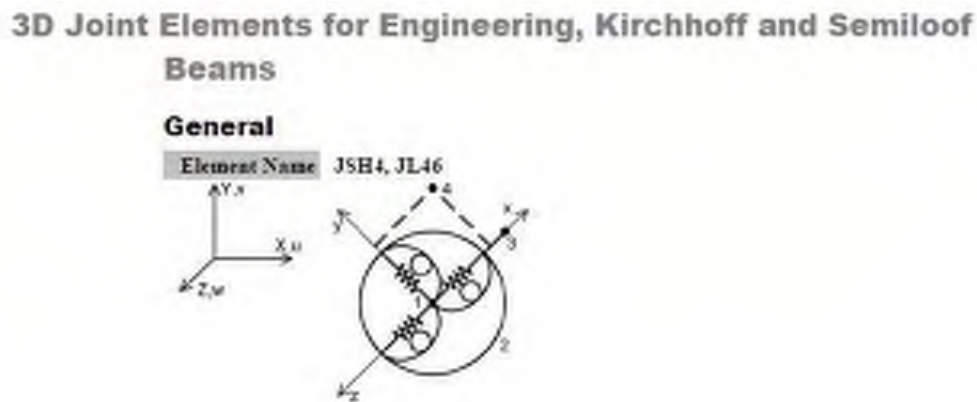


Figure 7 Illustration of a joint element for beams and the number of degrees of freedom (LUSAS, 2019)

2.3.2 Mesh

To solve the Finite Element analysis the object such as the surfaces, volumes or lines need to be split into discrete elements and nodes. This is called “meshing”. The number of nodes and elements can be adjusted to fit the object and the higher the number of elements the more accurate is the analysis. It is also possible to change the types of element that are created so it can fit different type of analysis, read 2.3.1 for different element types (LUSAS, 2018).

2.3.3 Earlier Research

Earlier research by C Builes Mejia (2010) investigated the stability for a column rebar cage during construction. In this study a Finite Element Model for a rebar cage with tie wire connections was made. The study included to see how the rebar cage deformed during tripping and lifting from the ground. The rebar cages that were investigated was assembled by tying the rebars together. The Finite Element Analysis was made with ADINA Software to see how the cage behaved during the lift and tripping (C Builes Mejia, 2010).

When C Builes Mejia (2010) made the model for the tie wire connection between the bars each intersection point got 2 nodes, one of these nodes was connected to the vertical element and the other to the horizontal. These two nodes were then linked together and given 6 degrees of freedom. Three degrees in translation (x, y, z) and three degrees in rotational (θ_x , θ_y , θ_z). Nodes were defined 1 ft from each intersection point in three orthogonal directions defined as normal-, vertical- and tangential-direction shown in Figure 8. Three truss elements and three spring elements were added between the three orthogonal nodes and the node for the vertical element in each connection to simulate the semi-rigid behavior shown in Figure 8. Each orthogonal node was also connected to the node in the horizontal element with rigid connections (C Builes Mejia, 2010).

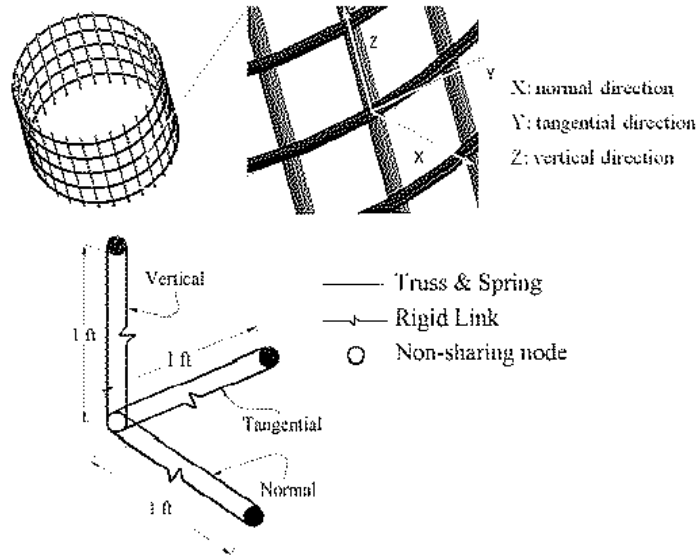


Figure 8 Concept used in earlier studies for modeling a connection in Finite Element Analysis (C Builes Mejia, 2010)

The connections have 6 degrees of freedom where 3 degrees are rotation ($\theta_x, \theta_y, \theta_z$) around the three axes. These rotations are acting semi rigid with the help of the 3 springs that are connected from the orthogonal nodes. The trusses between the orthogonal nodes describes the semi rigid connections in x-, y- and z-direction (C Builes Mejia, 2010).

C Builes Mejia (2010) conducted an analytical analysis on seven column rebar cage models to see how the behavior of the column rebar cages were affected when one degree of freedom at the time was released. This showed that the release of $k_{\theta_y}, k_{\theta_z}$ did not affect the behavior of the column rebar cage but the release of k_x, k_y, k_z and k_{θ_x} had significant effect on the lateral behavior of the column rebar cages.

C Builes Mejia (2010) also performed an experimental investigation where the stiffness of different tied rebar connections was tested in a laboratory. The experiment was divided into two groups: Tied connections performed by experienced iron workers and inexperienced iron workers. In order to evaluate the difference in stiffness for the connections. They tested 6 different types of tie wire connections and the strength of each specimen was tested in x, y, z and θ_x -directions. The θ_y - and θ_z -directions were in this case assumed to have free rotation since their effect on the lateral behavior on the column rebar cage was negligible and therefore no test was conducted in these two directions. Table 1 and Table 2 show the results for the average strength and stiffness of the tie wire connections from the experimental investigation.

Table 1 Average Maximum Strength of Tie Wire Connections in $F_{x,Rd}$, $F_{y,Rd}$, $F_{z,Rd}$ and $\theta_{Mx,Rd}$ (C Builes Mejia, 2010)

Tie Wire Connections Strength						
Connection Type	Experienced Iron Worker			Inexperienced Iron Worker		
	$F_{x,Rd}(N)$	$F_{y,z,Rd}(N)$	$M_{x,Rd}(Nm)$	$F_{x,Rd}(N)$	$F_{y,z,Rd}(N)$	$M_{x,Rd}(Nm)$
Snap tie	1356,71	1196,57	25,20	1249,95	827,37	22,37
Double Snap	2068,42	2250,80	52,99	1792,63	1392,29	57,62
Single-U	3029,24	2086,21	54,12	2406,49	2419,83	50,62
Double-U	5827,17	4599,46	103,04	4559,43	3207,17	95,47
Column Tie	4897,49	3603,06	58,53	4323,67	2704,52	57,96
Wrap-and Saddle	6196,37	5066,52	97,73	5496,55	4443,77	78,19

Table 2 Average Stiffness of Tie Wire Connections in Δx , Δy , Δz and θ_x (C Builes Mejia, 2010)

Tie Wire Connection Stiffness						
Connection Type	Experienced Iron Worker			Inexperienced Iron Worker		
	$k_x (N/m)$	$k_y, k_z (N/m)$	$k_{\theta x} (Nm/rad)$	$k_x (N/m)$	$k_y, k_z (N/m)$	$k_{\theta x} (Nm/rad)$
Snap tie	2078755,53	210677,58	45,86	1440768,47	39053,28	7,31
Double Snap	3069448,04	105076,10	69,13	1811511,98	59192,87	11,3
Single-U	4730000,69	218032,90	37,22	1941105,84	132220,76	8,64
Double-U	5971299,69	328362,82	37,89	2588549,75	163218,21	11,96
Column Tie	4871678,30	277400,91	21,27	2102222,53	55690,33	7,31
Wrap-and Saddle	5365010,59	433614,04	37,89	3482747,37	257086,19	60,48

3 *Method*

In order to answer the questions described in chapter 1.2 a literature study, survey and Finite Element Analysis were carried out. The literature study investigated the relation between Computer Aided Design and Computer Aided Engineering and earlier research about the stability in tied rebar cages and capacity of tie wire connections together with Finite Element Analysis. The literature study was carried out by searching and reading scientific articles from university library of both Luleå Technology University and Royale institute of Technology. Google scholar were also used to search for scientific articles.

To be able to answer question (a), a survey of the steps that are required to create a numerical model in LUSAS and the obstacles that occur along the way were carried out. This survey was done to compile the problems discovered in the literature study and to get more exact issues when dealing with LUSAS and Tekla. The survey together with the literature study led to a deeper understanding of the different disciplines and enables to see what kind of research that has already been done about this subject. To be able to specify how to solve the different obstacles that occurred along the way these obstacles were carefully monitored. During the survey the Finite Element Model was created manually to understand the different steps in this process in an accurate way.

To answer question (b) described in chapter 1.2, the behavior of the tie wire connections needs to be described and stiffness values were investigated. A better understanding of the behavior and the correct stiffness values should have been investigated through tests. These tests were not completed due to technical issues with the tie wire tool knut39 that was supposed to be used to assemble the rebar cage. Instead, the behavior and stiffness values for a tied connection were investigated in the literature study of earlier research. The stiffness values and behavior used in the Finite Element Method were collected from earlier tests.

The final question (c) described in chapter 1.2, could be answered with the Finite Element Analysis. Conditions to evaluate if the rebar cage could be lifted was specified from the reinforcement material data and the strength of the tie wire connections. Then the process to confirm if the cage could be lifted was done by iteration to find the most favorably lifting points. For this thesis it was also investigated how the tie wire connections affected the stability of the rebar cage. A sensitivity analysis was carried out to determine how the rebar cage was affected by the stiffness in the connections.

4 Finite Element Modeling of rebar cage

In this thesis a Finite Element Analysis was carried out on a specific rebar cage in the Finite Element program LUSAS Bridge, which is a software used to solve Finite Element problems for bridge constructions. The program can solve both linear and nonlinear problems with different materials, such as concrete, steel and composites. The analysis was carried out with LUSAS Bridge because Skanska Sverige AB uses this software for their Finite Element Analysis. The purpose of this analysis is to study the behavior of a tied rebar cage when it is exposed to lifting force to see if it is possible to lift it with a crane.

4.1.1 Geometry and material data

The rebar cage is for a bridge support in scale 1:2 and all the dimensions have been collected from the Tekla model provided by Skanska. The rebar cage has a length of 4,94m, a width of 1,74 m and a height of 0,42 m, all the dimensions have been collected from the Tekla model provided by Skanska. The cage is constructed of rebars with different cross section and shapes. The rebar cage contains rebars with shapes such as A, B, C and F and the diameter $[\emptyset]$ of the rebars varies from 8-12mm. Figure 9 shows the different rebar shapes and Figure 10 shows the geometry of the rebar cage.

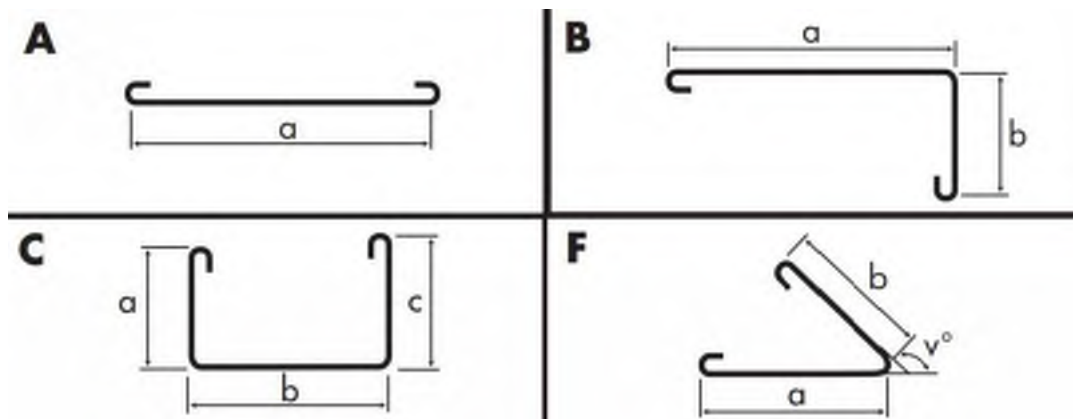


Figure 9 Different rebar shapes used to construct the rebar cage (BE GROUP, 2021)

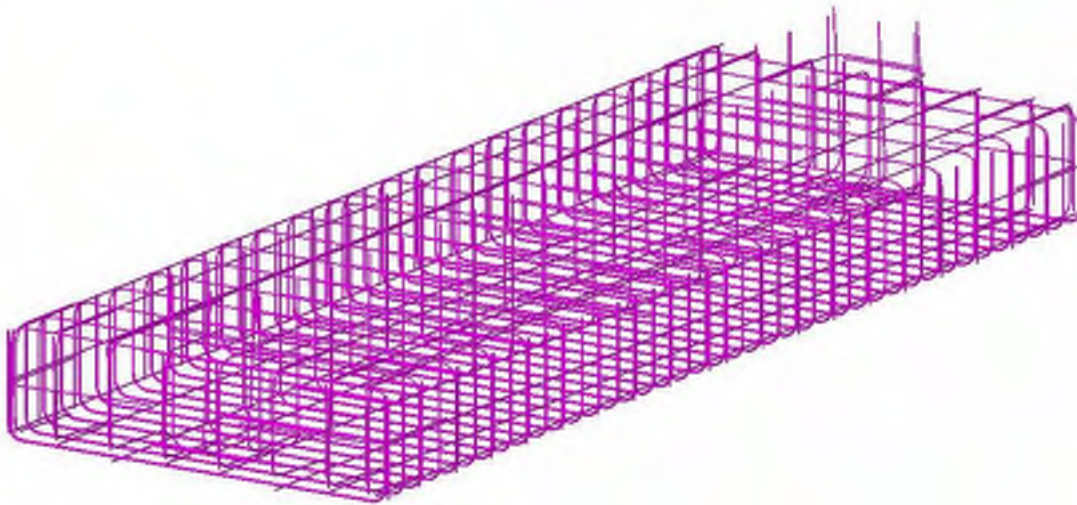


Figure 10 Geometry of rebar cage from the software LUSAS Bridge

All geometric and material data was taken from the CAD model in Tekla such as length of the elements, diameter [$\emptyset$], dimensions, weight and coordinates of end points for the elements. In the model there are two different types of steel qualities for the rebars, K500B and K500C. The difference between these two qualities is that K500C has a higher strain capacity which means it can deform more before the material reaches failure mode. Because this analysis is a linear analysis within the elastic phase, the material values will be the same for both qualities. Hence the material data for K500B has been chosen for Finite Element Analysis. Table 3 shows the material properties that was used as input data from the Tekla model.

Table 3 Properties of rebars K500B

Property	Value	Unit
Modulus of elasticity (E)	200 000	MPa
Poisson's ratio (ν)	0,3	-
f_y	500	MPa

The stress-strain curve for the reinforcement is shown in Figure 11 and the young modulus [E] represents gradient of the curve until the yield strength is reached. Because the analysis is linear the stress-strain curve will also be linear so the curve will continue to be linear even after the yield strength (f_{yk}) is exceeded.

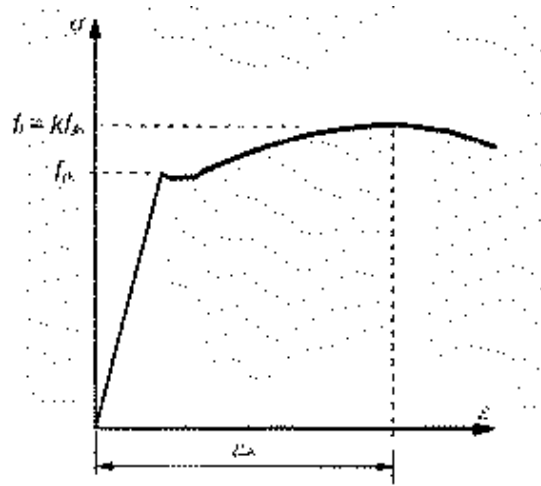


Figure 11 Stress and strain curve for hot rolled steel (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004)

The design yield strength for the steel according to EN-1991-1-1:

$$f_{yk} = \frac{f_y}{\gamma_s} = \frac{500}{1,15} = 435 \text{ MPa}$$

These values are later used to be able to analysis if the rebars will get plastic deformation.

4.1.2 Modeling technique

In order to create the FE-model the first step was to import the coordinates for each rebar, this will henceforth be referred to as structural part, from the CAD model in order to get a model as accurate as possible. When importing the coordinates from the CAD model, LUSAS translates these coordinates into nodes. Between these nodes a structural part can then be created. For rebars with shape A, a straight beam element can be created between two nodes. For rebars with shape B, two straight beam elements are created between three nodes and then the corner is modified from a 90-degree angle to the given radius for the specific rebar. Rebars with shape C and F are created in the same way, for more details of how these rebars are created, see 5.1.1.2. In this study the rebars were created with beam elements. These beam elements describe the centerline of the given cross-section.

When all the elements were created a mesh must be given to each rebar in order be able to solve the analysis. The meaning with mesh or meshing is to split the element into finite number of elements, in that way the partial differential equations can be solved, see 2.3.2. For this study a mesh size of 0,01m is used. In this case a line mesh with the elements type Thick beam was given to each structural part. Thick beam elements use Timoshenko beam theory and can model both axial, bending and torsional behavior, see 2.3.1.

When using beam elements, a geometry/cross-section need to be assigned to the elements. LUSAS has a cross-section library where you can either choose from different cross-sections or create the cross-section you need. In this case three different rebar cross-sections were created with the diameter of 8 mm, 10 mm and 12 mm.

LUSAS Bridge has a material library where you can choose between different materials and in this case rebars was chosen as material and then the steel grade K500B was selected as input with properties shown in Table 3.

4.1.3 Connections

The rebar cage in this study is a tied one. In general, a rebar connection that is tied with steel wire can't be seen as rigid or pinned due to the fact that it can rotate freely in some planes but is restrained in others and therefore the connection can be seen as semi-rigid, see 2.3.3. The type of tie that is used in this study is a snap tie, see Figure 5 Example of different types of tie wire types used in the field Figure 5. The strength and the spring stiffness k_s of this kind of tied connection will be collected from the experimental investigation that C Builes Mejia (2010) carried out. This experimental investigation was performed on a connection where only two rebars intersect. The model in this study will contain connections with more than two rebars intersecting and therefore assumptions has been made about how these connection should be modelled, see 4.1.3.2 and 4.1.3.3.

C Builes Mejia (2010) states in the same study that the rotations θ_y and θ_z in a connection have no influence on the lateral behavior in a rebar cage. Therefore, the rotational stiffness is k_{θ_v} and k_{θ_w} can be seen as zero and this will be applied in this study as well, see Figure 12 and Figure 13 for the translational and rotational directions for the connections. The spring stiffness k_s is collected from the results conducted by an experienced iron worker. Since the tie wire connections in this thesis should simulate tie wire connections made by a power driven tying gun (2.1.1), the higher stiffness values were chosen. The stiffness for the different degrees of freedom can be seen in Table 4.

Table 4 Stiffness values for the snap tie connection

Tie Wire Connection Stiffness k_s			
Connection Type	k_x (N/m)	k_y, k_z (N/m)	$k_{\theta x}$ (Nm/rad)
Snap tie	2078755,53	210677,58	45,86

There are different ways to model a semi-rigid connection. LUSAS offers a simple way of doing it by model a joint element between two nodes that will act like a spring that has six degrees of freedom (2.3.1) and a spring stiffness k_s . The joint element is defined by a local coordinate system in its own direction and where k_s is:

$$k_s = \begin{bmatrix} k_u \\ k_v \\ k_w \\ k_{\theta_u} \\ k_{\theta_v} \\ k_{\theta_w} \end{bmatrix}$$

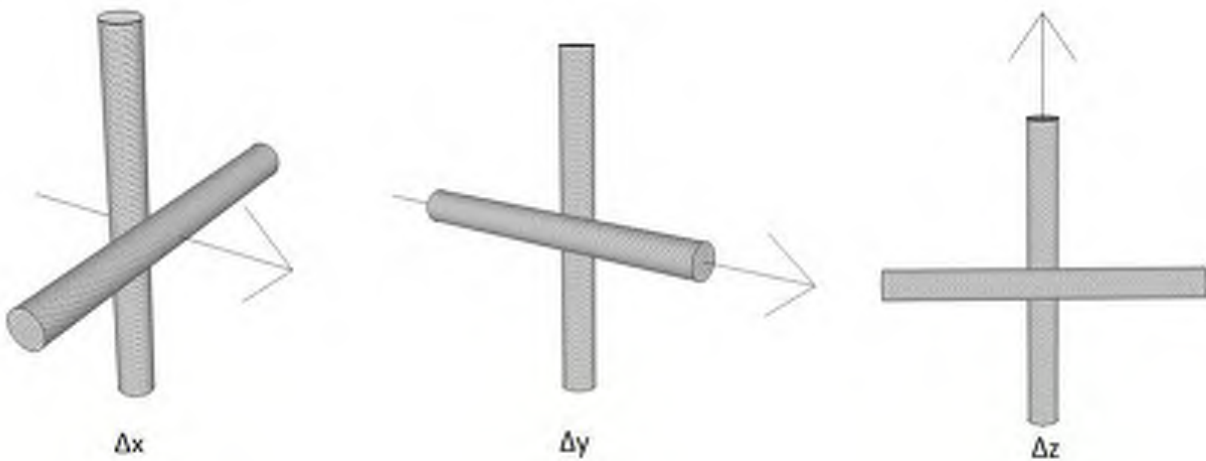


Figure 12 Translational direction for connections in Δx , Δy and Δz

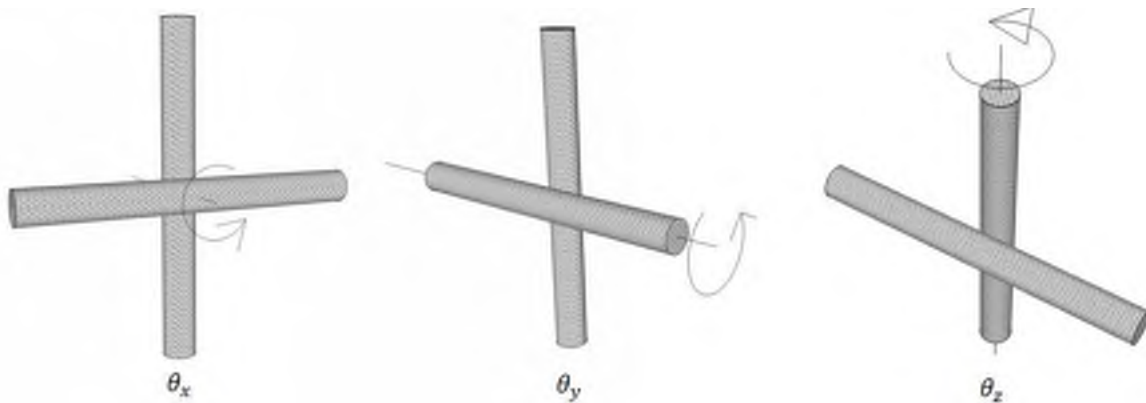


Figure 13 Rotational direction for connections in θ_x , θ_y and θ_z

In this model all intersection points and overlaps between the rebars has a joint element. The joint elements are modelled 100 mm from each end of the rebars that overlap. This model will also contain three different types of connections (A, B, C). The first is when two rebars are tied together (A), the second one is when 3 rebars are tied (B) and the third is when four rebars are tied together (C). The similarity between all these connection types is that only one tie wire is used in every connection to tie the rebars together despite how many rebars there are in one connection. Hence the assumption that the total stiffness for the connections will be the same.

When the connections in LUSAS are modelled a joint element is used to simulate the tie wire as mentioned before. For connection type A with two rebars intersecting there will be one joint element, connection type B contains three rebars and to simulate the tie wire three joint elements will be modelled and for connection type C which contains four rebars eight joint elements will be modelled to simulate the tie wire. This will be described more in (4.1.3.1-4.1.3.3). Note that in reality the rebars lie on top of each other but in the model, there is a distance of 5 mm between them in order to be able to model the joint element between them and the joint element is created between the center of the cross-section for the rebars.

4.1.3.1 Connection A

Connection A is created when only two rebars intersect and in reality, the rebars will be tied close together like in Figure 14. When the tie wire connection is modeled in LUSAS they will be modeled with a small distance apart and with a joint element to connect them together which will represent the tie wire in reality, see Figure 15. The distance between the rebars in the model has no effect on the results no matter how great it is.

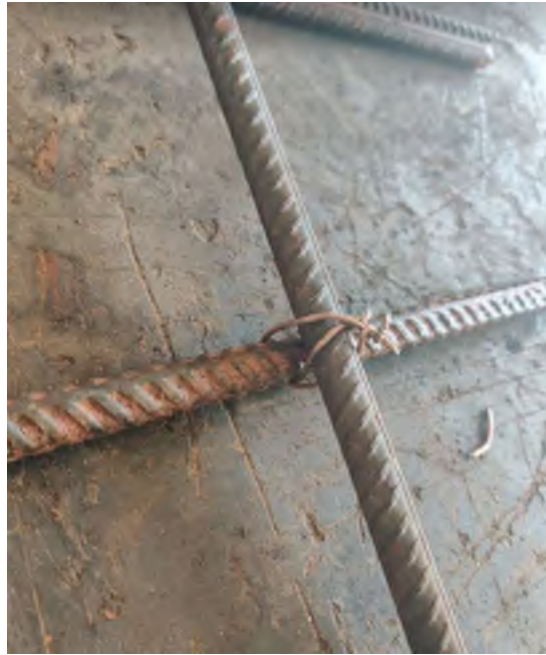


Figure 14, Illustration of connection type A in reality

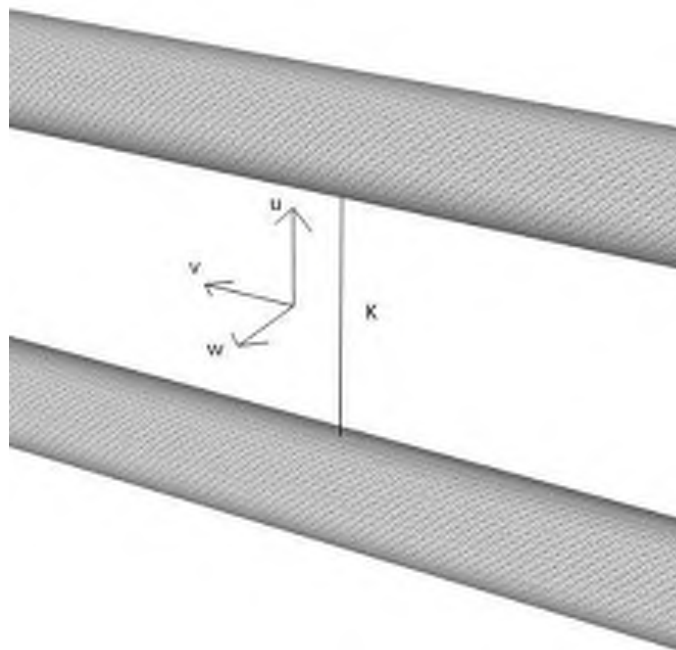


Figure 15 Illustration of a connection type A with joint element (K) and local coordinates (u, v, w)

Connection A is created when only two rebars intersect, see Figure 15. Connection A consists of one joint element and can therefore be assigned the full connection stiffness k_s from Table 4.

$$k_s = K = K_{A1} = \begin{bmatrix} k_u \\ k_v \\ k_w \\ k_{\theta_u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2078755,53 \\ 210677,58 \\ 210677,58 \\ 45,86 \end{bmatrix}$$

4.1.3.2 Connection B

Connection B is created when three rebars intersect with each other, see Figure 16. Connection B will be modeled with three joint elements that will connect the rebars with each other, the rebars in this connection will also be modeled with a small distance apart from one and other, see Figure 17.



Figure 16, Illustration of connection type B in reality

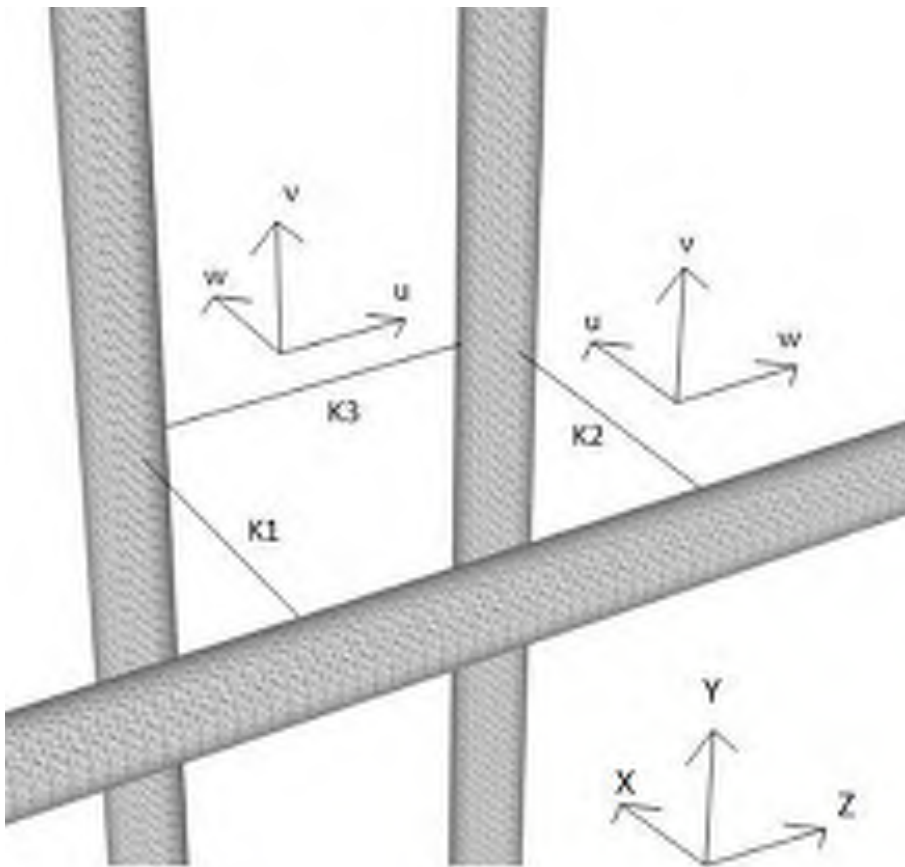


Figure 17 Illustration of a connection type B with joint elements (K_1 , K_2 and K_3) and local coordinates (u , v , w)

Connection B is created when three rebars intersect and consists of three joint elements K_1 , K_2 and K_3 which later will be referred as K_{B1} , K_{B2} and K_{B3} , see Figure 17. The connection stiffness

k_s from C Builes Mejia (2010) is based on a connection type A and if k_s is assigned to all three joint elements the result would be a connection that is more rigid. That's why the following assumptions has been made about how each joint element works in a type B connection. Each joint element has the local stiffness K_i and where $k_{\theta_y} = k_{\theta_z} = 0$, if the local stiffness K_i is summarized into the global stiffness K_s :

$$K_{B1} = \begin{bmatrix} k_{u1} \\ k_{v1} \\ k_{w1} \\ k_{\theta_{u1}} \end{bmatrix}$$

$$K_{B2} = \begin{bmatrix} k_{u2} \\ k_{v2} \\ k_{w2} \\ k_{\theta_{u2}} \end{bmatrix}$$

$$K_{B3} = \begin{bmatrix} k_{u3} \\ k_{v3} \\ k_{w3} \\ k_{\theta_{u3}} \end{bmatrix}$$

$$K_s(x, y, z, \theta_x) = K_{B1} + K_{B2} + K_{B3} = \begin{bmatrix} k_{u1} + k_{u2} + k_{u3} \\ k_{w1} + k_{w2} + k_{w3} \\ k_{v1} + k_{v2} + k_{v3} \\ k_{\theta_{u1}} + k_{\theta_{u2}} \end{bmatrix}$$

In order to determine the local stiffness K for each joint element the following assumptions has been made:

$$K_s(x) = (k_{u1} + k_{u2} + k_{w3}) = k_x \rightarrow k_{u1} = k_{u2} = \frac{k_x - k_{w3}}{2} = 934038,96 \text{ N/m}$$

Where:

$$k_x = 2078755,53 \text{ N/m}$$

$$k_{w3} = 210677,58 \text{ N/m}$$

The stiffness in z-direction (k_z) cannot be higher than the given value 210677,58 N/m and that is why u_3 will be assumed to be zero due to that the stiffness in x-direction k_x is a lot higher than the stiffness in z-direction k_z .

$$K_s(z) = (k_{w1} + k_{w2} + k_{u3}) = k_y \rightarrow k_{w1} = k_{w2} = \left(\frac{k_z}{2}\right) = 105338,80 \text{ N/m}$$

Where:

$$k_z = 210677,58 \text{ N/m}$$

For the stiffness in y-direction (k_y):

$$K_s(y) = (k_{v_1} + k_{v_2} + k_{v_3}) = k_y \rightarrow k_{v_1} = k_{v_2} = k_{v_3} = \left(\frac{\Delta z}{3}\right) = 70225,86 \text{ N/m}$$

Where:

$$k_y = 210677,58 \text{ N/m}$$

For the rotational stiffness in x-direction (k_x) it is assumed that only K_{B1} and K_{B2} have rotational stiffness:

$$K_s(k_{\theta x}) = (k_{\theta u1} + k_{\theta u2}) = k_{\theta u} \rightarrow k_{\theta u1} = k_{\theta u2} = \frac{k_{\theta x}}{2} = 22,93 \text{ Nm/rad}$$

Where:

$$k_{\theta x} = 45,86 \text{ Nm/rad}$$

This means that the following stiffness K_i for each joint element should be:

$$K_{B1} = \begin{bmatrix} 934038,96 \\ 70225,86 \\ 105338,80 \\ 22,93 \end{bmatrix}$$

$$K_{B2} = \begin{bmatrix} 934038,96 \\ 70225,86 \\ 105338,80 \\ 22,93 \end{bmatrix}$$

$$K_{B3} = \begin{bmatrix} 0 \\ 70225,86 \\ 210677,58 \\ 0 \end{bmatrix}$$

4.1.3.3 Connection type C

Connection C is created when four rebars intersect with each other, see Figure 18. Connection C will be modeled with eight joint elements that will connect the rebars with each other, the rebars in this connection will also be modeled with a small distance apart from one and other, see Figure 19.



Figure 18, Illustration of connection type C in reality

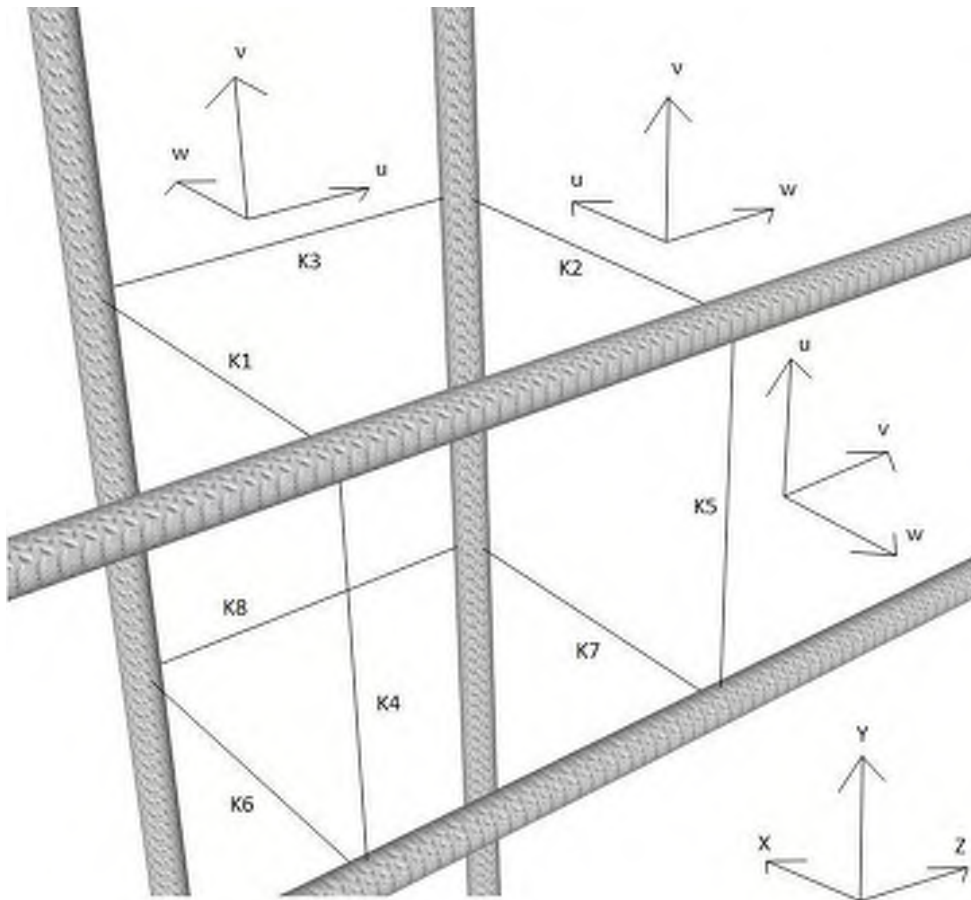


Figure 19 Illustration of a connection type C with joint elements (K_1 - K_8) and local coordinates (u , v , w)

Connection type C is created when four rebars intersect and consist of eight joint elements $K_1 \rightarrow$

K_8 which will be referred as $K_{C1} \rightarrow K_{C8}$, see Figure 19. Connection type C works similar to connection type B and therefore the following assumptions has been made about how stiff each joint element should be. The different joint elements have the following local stiffness:

$$K_{C1} = \begin{bmatrix} k_{u1} \\ k_{v1} \\ k_{w1} \\ k_{\theta u} \end{bmatrix}$$

$$K_{C2} = \begin{bmatrix} k_{u2} \\ k_{v2} \\ k_{w2} \\ k_{\theta u2} \end{bmatrix}$$

$$K_{C3} = \begin{bmatrix} k_{u3} \\ k_{v3} \\ k_{w3} \\ k_{\theta u} \end{bmatrix}$$

$$K_{C4} = \begin{bmatrix} k_{u4} \\ k_{v4} \\ k_{w4} \\ k_{\theta u4} \end{bmatrix}$$

$$K_{C5} = \begin{bmatrix} k_{u5} \\ k_{v5} \\ k_{w5} \\ k_{\theta u} \end{bmatrix}$$

$$K_{C6} = \begin{bmatrix} k_{u6} \\ k_{v6} \\ k_{w6} \\ k_{\theta u6} \end{bmatrix}$$

$$K_{C7} = \begin{bmatrix} k_{u7} \\ k_{v7} \\ k_{w7} \\ k_{\theta u} \end{bmatrix}$$

$$K_{C8} = \begin{bmatrix} k_{u8} \\ k_{v8} \\ k_{w8} \\ k_{\theta u} \end{bmatrix}$$

If each local stiffness K_i is summarized into one global stiffness K_s :

$$K_s(x, y, z, \theta_x) = \sum_1^8 K_i$$

One assumption is that $k_{u_i} = k_u, k_{v_i} = k_v, k_{w_i} = k_w, k_{\theta_{xi}} = k_{\theta_x}$. The stiffness in the global x-direction is the following:

$$K_s(x) = (k_{u_1} + k_{u_2} + k_{w_3} + k_{w_4} + k_{w_5} + k_{u_6} + k_{u_7} + k_{w_8}) = k_x = 4k_u + 4k_w \rightarrow$$

$$k_{u_{1,2,6,7}} = \frac{k_x - 4k_w}{4} = 309011,3025 \text{ N/m}$$

Where:

$$k_x = 2078755,53 \text{ N/m}$$

$$k_z = k_{w_{3,4,5,8}} = 210677,58 \text{ N/m}$$

For the stiffness in global y-direction it is assumed that $u_i = 0$ since $\Delta x \gg \Delta y$. The stiffness in y-direction is the following:

$$K_s(y) = (k_{v_1} + k_{v_2} + k_{v_3} + k_{u_4} + k_{u_5} + k_{v_6} + k_{v_7} + k_{v_8}) = k_y = 6k_v \rightarrow k_{v_{1,2,3,6,7,8}} =$$

$$\left(\frac{k_y}{6}\right) = 35112,93 \text{ N/m}$$

Where:

$$k_y = 210677,58 \text{ N/m}$$

The same assumption that $k_{u_i} = 0$ has been made for the global stiffness in z-direction and that $k_v = k_w$. The stiffness in z-direction is the following:

$$K_s(z) = (k_{w_1} + k_{w_2} + k_{u_3} + k_{v_4} + k_{v_5} + k_{w_6} + k_{w_7} + k_{u_8}) = k_z = 6k_w \rightarrow k_{w_{1,2,6,7}} =$$

$$\left(\frac{k_z}{6}\right) = 35112,93 \text{ N/m}$$

Where:

$$k_z = 210677,58 \text{ N/m}$$

For the global rotational stiffness its assumed that only joint element $K_{C1}, K_{C2}, K_{C6}, K_{C7}$ has rotational stiffness. The global rotational stiffness is the following:

$$K_s(\theta_x) = (k_{\theta_{x1}} + k_{\theta_{x2}} + k_{\theta_{x6}} + k_{\theta_{x7}}) = k_{\theta_x} = 4k_{\theta_{x1,2,6,7}} \rightarrow \frac{k_{\theta_x}}{4} = 11,465 \text{ Nm/rad}$$

Where:

$$k_{\theta_x} = 45,86 \text{ Nm/rad}$$

This means that the following stiffness K for each joint element should have:

$$K_{C1} = \begin{bmatrix} 309011,3025 \\ 35112,93 \\ 35112,93 \\ 11,465 \end{bmatrix}$$

$$K_{C2} = \begin{bmatrix} 309011,3025 \\ 35112,93 \\ 35112,93 \\ 11,465 \end{bmatrix}$$

$$K_{c3} = \begin{bmatrix} 0 \\ 35112,93 \\ 210677,58 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$K_{c4} = \begin{bmatrix} 0 \\ 35112,93 \\ 210677,58 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$K_{c5} = \begin{bmatrix} 0 \\ 35112,93 \\ 210677,58 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$K_{c6} = \begin{bmatrix} 309011,3025 \\ 35112,93 \\ 35112,93 \\ 11,465 \end{bmatrix}$$

$$K_{c7} = \begin{bmatrix} 309011,3025 \\ 35112,93 \\ 35112,93 \\ 11,465 \end{bmatrix}$$

$$K_{c8} = \begin{bmatrix} 0 \\ 35112,93 \\ 210677,58 \\ 0 \end{bmatrix}$$

4.1.4 *Supports and loading*

The supports in this model symbolizes the lifting points for the crane and in this model there are four supports. The supports are modelled in four intersection points at the top of the rebar cage where two of the supports are fixed in (x, y, z) but can rotate freely in $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ and the other two are modelled as pinned and is only restrained in (z) . They are placed in such a way that along the short edge there is one support that are fixed in (x, y, z) and one support which is only fixed in (z) and then they are placed mirror-inverted along the other edge. They are distributed in this way to avoid rotation around the support which is fixed in (x, y, z) .

The lifting points along the long edge are placed to get an even moment distribution along the cage. To find the exact points for lifting, a simplified analysis of the moment distribution was made in the software FE-beam. The analysis was made in 2D along the long edge as a simply supported beam with the length equal to the rebar cage and a disturbed load of 1 kN/m. The supports (lifting points) were adjusted to get approximately the same support and span moment, see results in Figure 20.

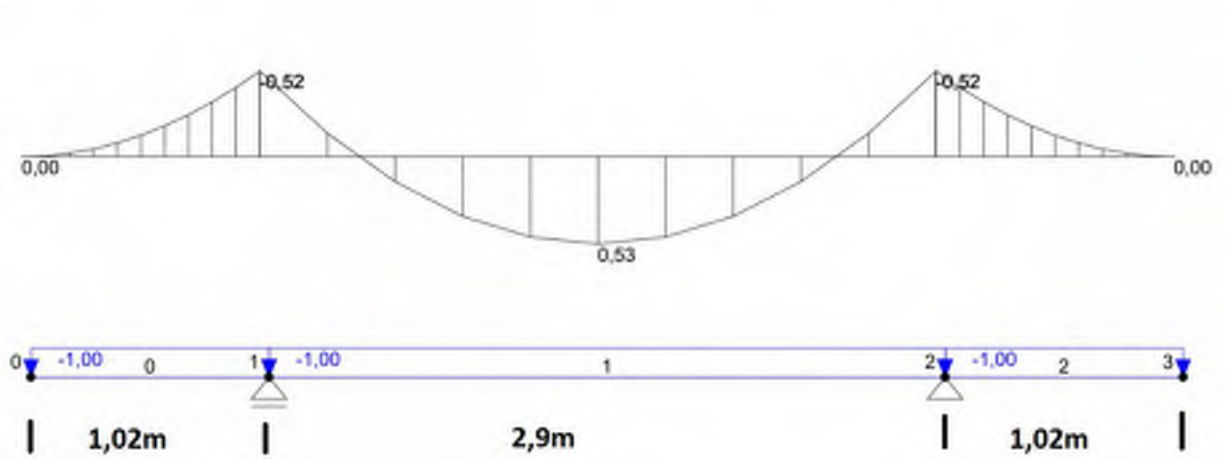


Figure 20 Moment distribution along the long edge of the rebar cage if supports (lifting points) are placed 1,02m from the edges.

The most even distribution will occur along the long edge when the supports (lifting points) are placed 1,02 m from the edge. The lifting points in the cage will be placed in a connection between two rebars to be able to lift in two bars in each lifting point. The lifting points were placed in the closest intersection points from the results shown in Figure 20. Along the long edge the lifting points were placed 1,02 m from the end. The lifting points placements along the short edge weren't placed to get an even moment distribution but instead they were placed to reduce stresses in the bent rebars. This is because in the ends along the short side there are arches that will generate high stress in the rebars. This occurs when the geometry changes, in this case from a straight line to a corner and this will interrupt the stress flow and generate higher stress in that areas. Therefore, the lifting points were placed close to the ends to reduce the stresses in the rebars. Figure 21 shows the exact placement in the cage.

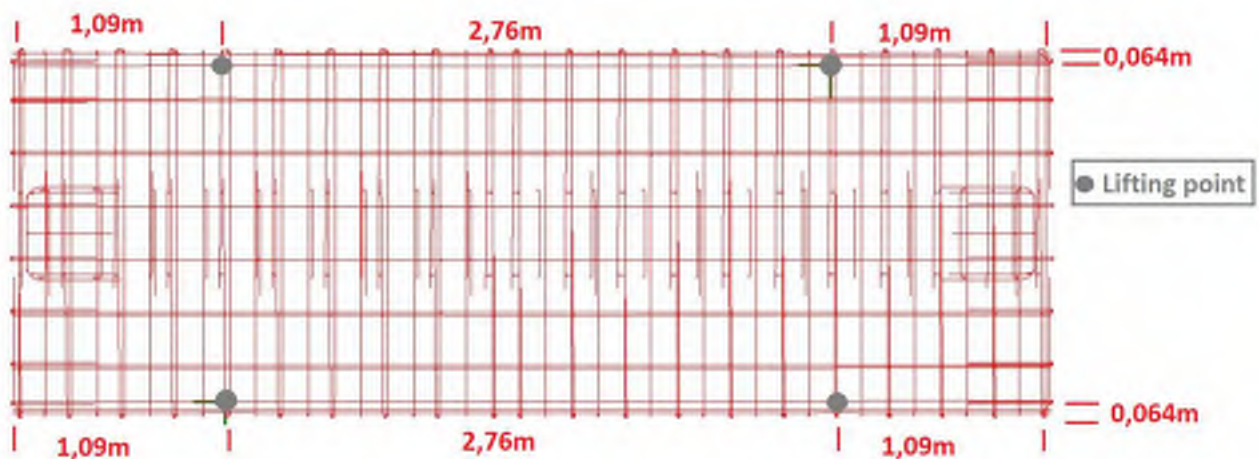


Figure 21 An overview of the rebar cage with the positions for the supports that symbolize lifting points

The load that exists on the rebar cage is the deadload and the lifting force from the crane. Both forces are modelled as gravity that acts like an acceleration force, the acceleration speed for a crane is according to Alimak (2021) equal to $0,4 \text{ m/s}^2$. The total force is than:

$$g_{tot} = g_{crane} + g = 0,4 + 9,82 = 10,22 \text{ m/s}^2$$

4.1.5 Analysis

In this study two types of analyses are carried out. The first one is to determine if the rebar cage is liftable and the second one is a sensitivity analysis to determine how sensitive the rebar cage is to the change of connection stiffness. The sensitivity analysis will be carried out in five steps, from 100-50% of connection stiffness.

Since there are no standards or guidelines to follow in order to determine if a rebar cage is stable and liftable, the following criteria has been decided to determine if the rebar cage is liftable, (1) The stress cannot exceed the yield limit at 435 MPa for the rebars, (2) the forces in the joint elements cannot exceed the connection design strength. Hence the following results will be looked at:

- Maximum stress for the rebars
- Force in x-, y- and z-direction for joint elements
- Moment in x-direction for joint elements

Since there is no easy way to determine if the rebar cage can be lifted based on deformations there will be no criteria for this. But deformations will be looked at just to see how the rebar cage behaves when the stiffness capacity is changed.

4.1.6 Verification of total load

The Finite Element model need to be verified to ensure that the total load in the supports are correct. In this case the model is verified with the dead load. The dead load is hand calculated with the reinforcement specification from Tekla structures, Table 5 shows the amount and weight of rebars.

Table 5, Reinforcement specification from Tekla model.

Type	Weight (kg)	St	Total weight (kg)
A	3,04	16	48,64
C1	1,57	40	62,8
B1	0,94	42	39,48
B2	0,49	32	15,68
B3	0,92	4	3,68
F	0,63	6	3,78
B4	0,51	4	2,04
C2	1,04	9	9,36
B5	0,7	20	14
Total weight (Kg)			199,46

The total deadload is multiplied with the gravity ($9,82 \text{ m/s}^2$) and the acceleration force ($0,4 \text{ m/s}^2$) for the crane and then the total force is compared with the total forces F_z in the four supports to make sure they are corresponding.

5 Result

5.1 CAD and CAE survey

The CAD and CAE survey shows the process when creating the numerical model and how the data from the geometric model was used (Figure 22). The process investigated in the survey represented in Figure 22 shows that some of the steps while creating the numerical model uses data that can be found in the geometric model. The main data that was used from the geometrical model was the geometry which is described in coordinates and the material properties for the rebars (see 4.1.1) and cross-section area which are described in text. During the process of building the numerical model some of the steps need data that isn't possible to collect from the geometric model. The data created in the numerical model is the mesh of the elements together with the connections, load case and supports.

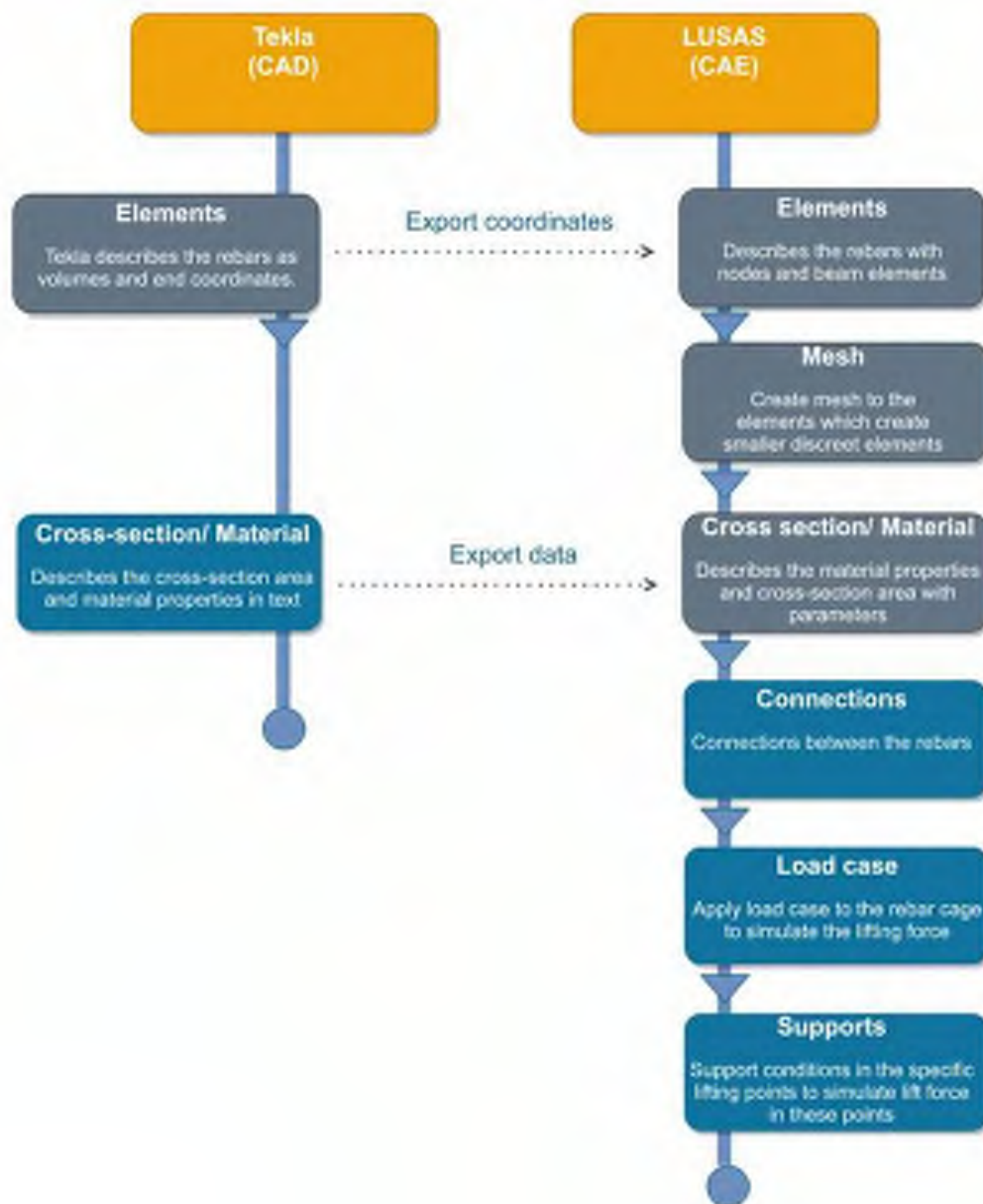


Figure 22 Workflow showing the steps creating a numerical model with data from geometrical model.

The survey showed that when using data from the geometric model there are some issues. Some of the issues was software related which isn't treated in this thesis. Issues that are related to the numerical model are presented for each step in the process in chapter 5.1.1.

5.1.1 Problem areas in the process of creating a numerical model

5.1.1.1 Material and cross section

The material properties and cross-section area for the rebars in the model was specified for each bar in the numerical model to do the Finite Element Analysis. This data is available in the Tekla-model for both cross-section area and material properties. During the survey it was discovered that Tekla (CAD) and LUSAS (CAE) described the data in different ways. Figure 23 describes which data CAD and CAE have/need and how the two models describe the material and cross-section data.

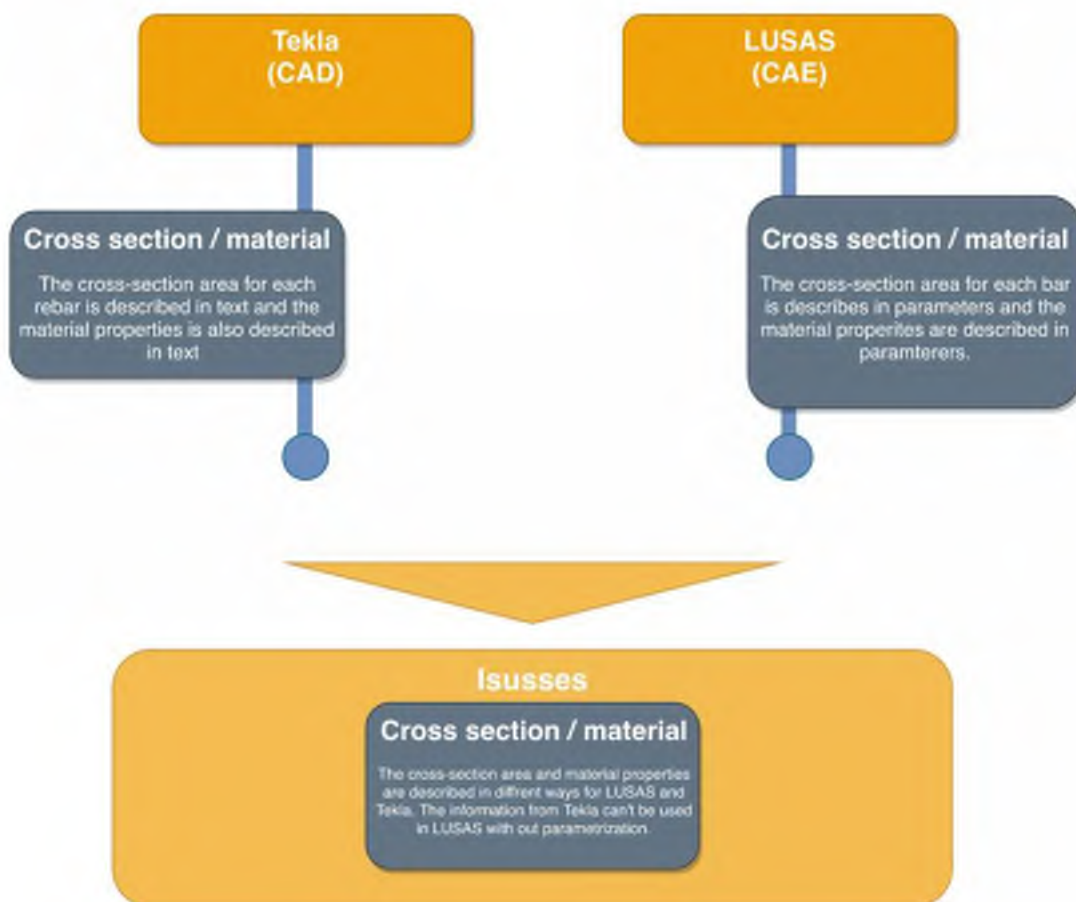


Figure 23 Cross-section and material properties integration issues between Tekla and LUSAS

The material and cross-section data available from Tekla are not compatible with LUSAS as Figure 23 presents. Tekla describes the data as text and LUSAS describes this data as parameters. LUSAS need to describe the cross-section and material data as parameters to be able to solve the calculations for the Finite Element Analysis.

5.1.1.2 Geometry

When creating the numerical model with data from the geometric model the geometry is an important part. Tekla describe the geometry of the rebars with volumes but can describe them with end coordinates for each rebar. LUSAS describes the geometry with nodes and beam elements between these. Figure 24 describes the process when creating the geometry in the numerical model with the geometrical data from Tekla.

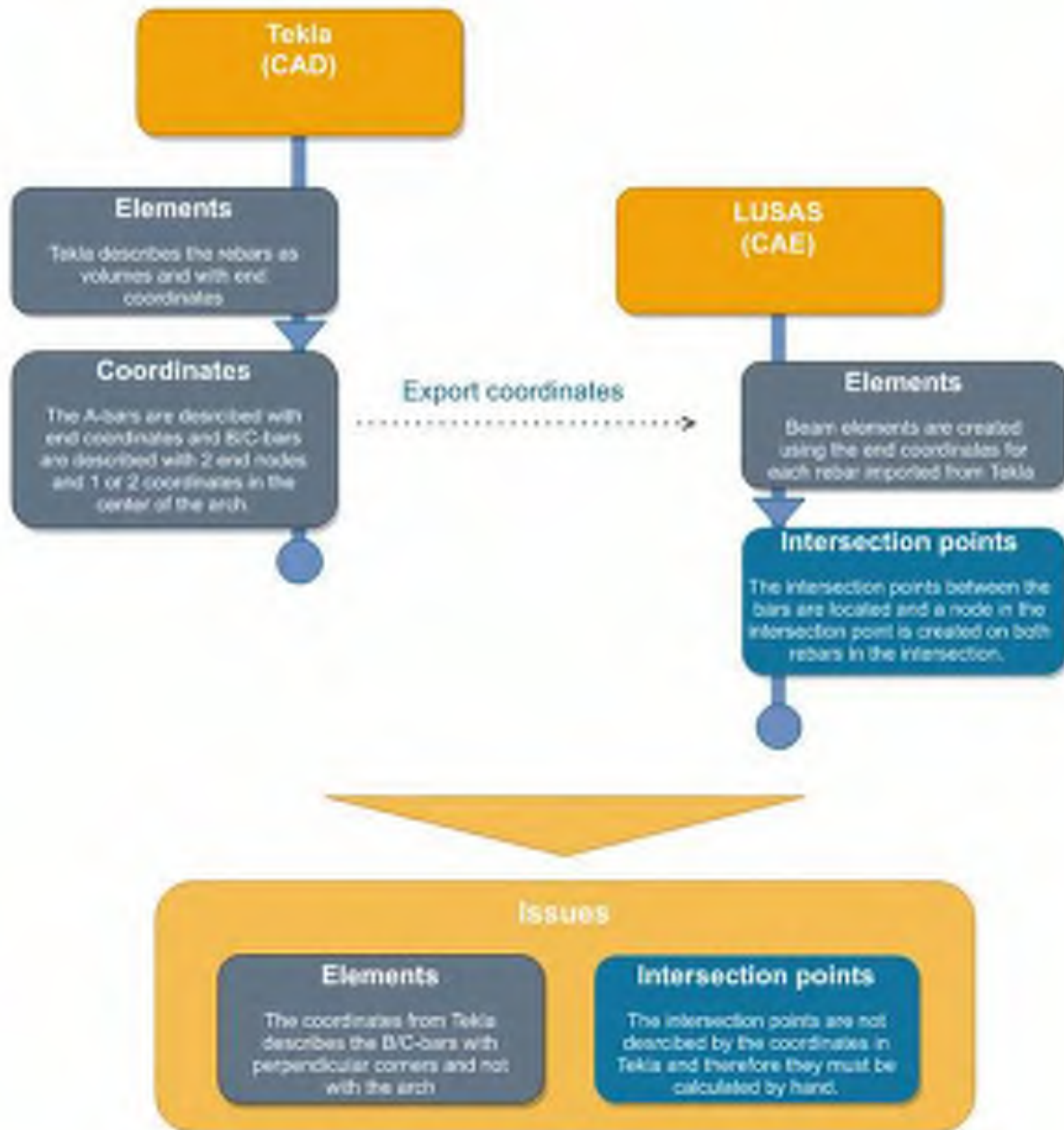


Figure 24 Geometry integration issues between Tekla and LUSAS

Figure 24 show some issues in the process when creating the geometry in the numerical model. The coordinates from Tekla describes the A-bars with two end nodes, B-bars with two end nodes and one node in the center of the arch and the C-bars with two end nodes and two nodes in the center of each arch see Figure 25. When importing the coordinates that describes the

B/C-bars from Tekla to LUSAS it will create a beam element with perpendicular corner (Figure 25). This corner is created because the information that says which radius the bars have are described as text in Tekla and it is not possible for LUSAS to import. The arches for the B/C-rebars needed to be created by hand in LUSAS which is a time consuming and inefficient process.

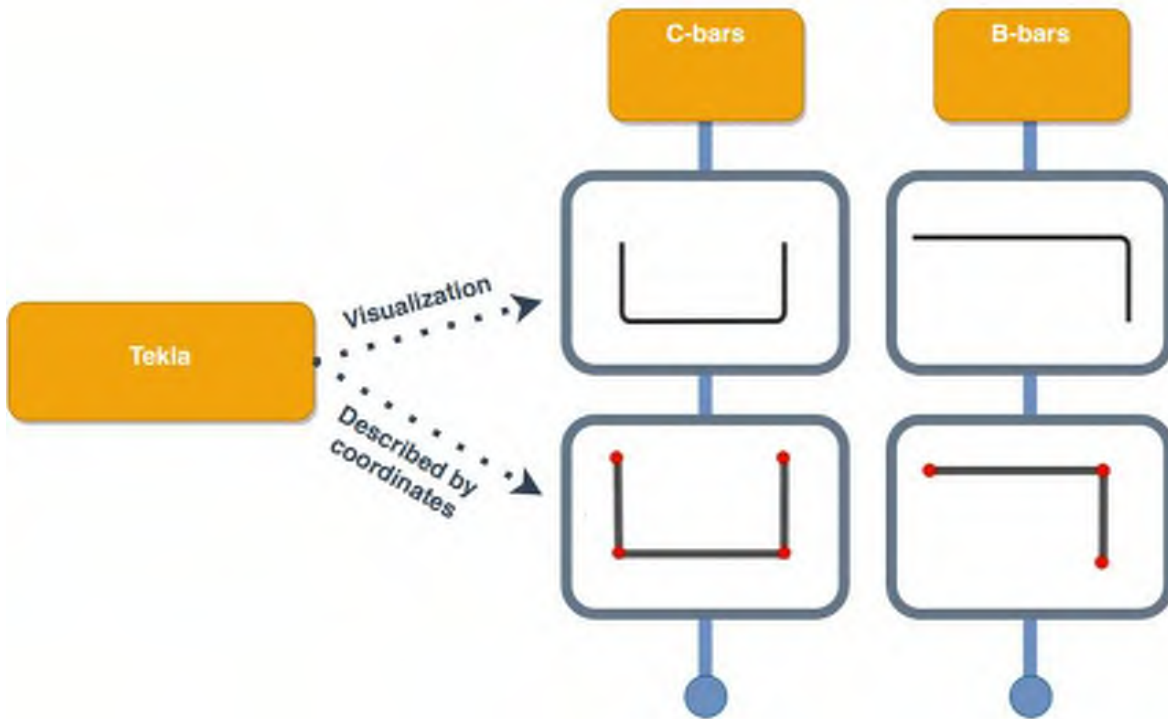


Figure 25 Visualization of B/C-bars and the way they are described by coordinates in Tekla

Another issue that is shown in the survey, see Figure 24, is the intersection point between the bars. Creating the intersection points need to be made manually because the information about these points are not available from Tekla. These intersection point need to have a node to be able to create a connection between the bars later in the modeling process. The process of finding these intersection points and create the nodes for the connections manually is an inefficient process.

5.1.1.3 Connections

The survey of the process between CAD and CAE showed some difficulties when modeling the connections. The process when creating a connection in the numerical model in LUSAS is shown in the Figure 26. The process has three main steps, and the survey identified several problems when some of these steps where executed.

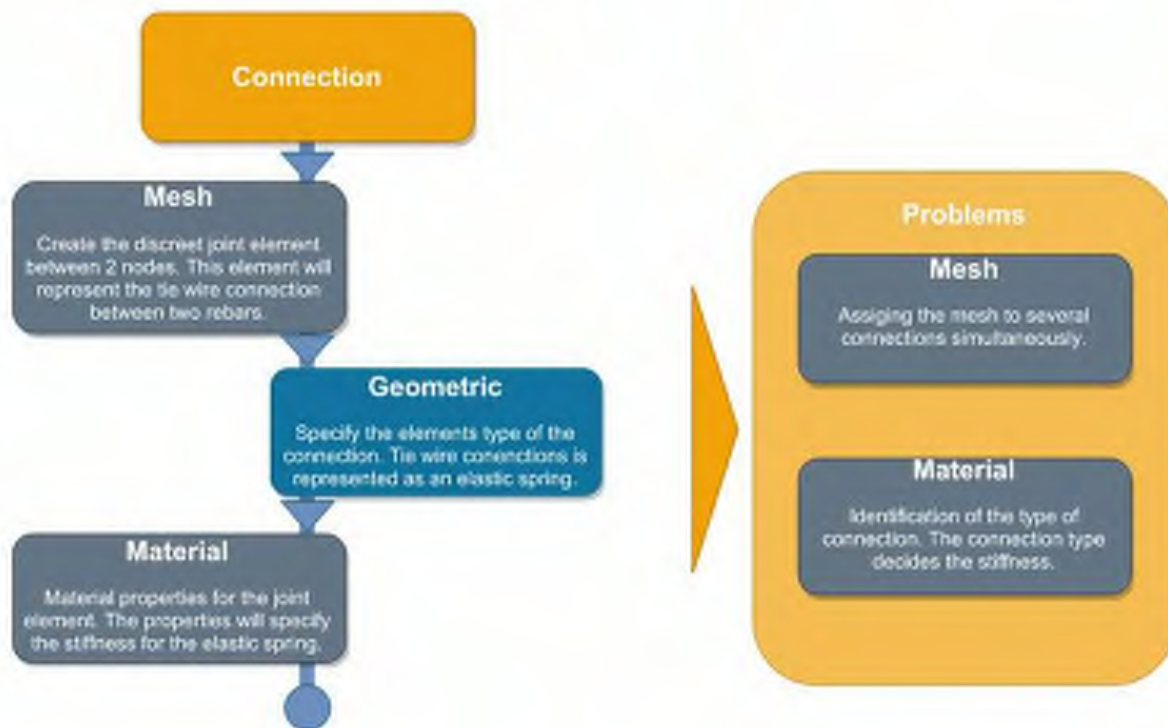


Figure 26 Issues while modeling connections in LUSAS

Figure 26 shows that there is an issue while creating the point-mesh for the connections. The Finite Element Model of a rebar cage will contain several connections with different properties. These connections are created for each intersection point in LUSAS as described in chapter 4.1.3. This means that for each connection in the model you need to specify a mesh, geometric- and material-properties. One of the issues with this is that when creating the point-mesh it must be created for one connection at the time. This is a time-consuming process when the rebar cage contains several hundred or thousands of connections.

Another issue that are presented in Figure 26 is the different types of connections. The discreet joint element connecting the rebars together need to be assigned differently for different types of connection. For the specific rebar cage investigated in this study there are three different types of connections (4.1.3). The issue with this is creating the discreet joint elements for these connections which needs to be done by hand for every connection.

The survey also showed an issue with the material properties which will decide the stiffness for the elastic spring in the connections. These connections need different stiffnesses that need to be taken into account when creating the model. This means that for each type of connection you need different material properties to define the stiffness (4.1.3). The issue with this is assigning these material properties for all the different connection types need to be done manually which is a demanding process.

5.1.1.4 Load case and support

The survey showed the process for assigning load case, see chapter 4.1.4. Figure 27 describes the process for Load case and support.



Figure 27, Workflow for assigning load case and support in the Finite Element Model

Load case

Assign the dead load for the rebar cage with the gravitational acceleration and crane lifting acceleration. This will act as the lifting force.

Lifting points

Select the lifting point for the rebar cage. The lifting points are selected in such a way so that the rebar cage fulfills the conditions for lifting.

Supports

The supports are assigned in the previously selected lifting points. At least two supports need to be fully restrained in x- and y-direction for LUSAS to be able to solve the equations for the Finite Element Analysis. When using two fully restrained nodes the horizontal forces in the cage needs to be checked to ensure that these forces does not affect the stability of the rebar cage because in reality there will be no fully restrained supports.

In this process the survey didn't show any specific issues and the process works in an efficient way for the project.

5.1.1.5 *Analysis*

The survey shows that when the previous steps are completed the analysis can be executed. The analysis is done by LUSAS and the results are presented. If the results show that the lift of the rebar cage does not fulfill all the conditions some changes need to be done to satisfy the conditions. The analysis shows if the rebar cage can be lifted.

5.2 Verification of reaction forces in FEM-model

To ensure in some way that the model is correct a comparison between the hand calculated dead load for the reinforcement specification in Tekla and the total reaction force in the Finite Element Analysis is carried out, see Figure A 14 for reaction forces from the Finite Element Analysis.

The hand calculated dead load equals to:

$$F_{hand\ calculated\ dead\ load} = 199,46 * 10,22 = 2038,481\ N$$

The total reaction force from the Finite Element Analysis equals to:

$$R_{tot} = 2012,05\ N$$

The results show that the hand calculated dead load is 26,431 N higher than the results from the Finite Element Analysis this is an error of 1,3%.

5.3 Finite Element Analysis

In this section the results for the worst case for the model with full connection stiffness are showed, for more result see Appendix A: LUSAS results full connection stiffness. The results display the maximum value in z-, x- and y- directions for each criterion mentioned in section 4.1.5. The results for deformations are defined by the global coordinate system meanwhile the results for the forces are displayed in the local coordinate system for respectively joint element that has the maximum value.

5.3.1 Maximum deformations

Table 6 Maximum deformation for rebars in z-, x- and y-direction for a joint element with full stiffness capacity

Deformations		
dz (mm)	dx (mm)	dy (mm)
75,0	20,2	2,9

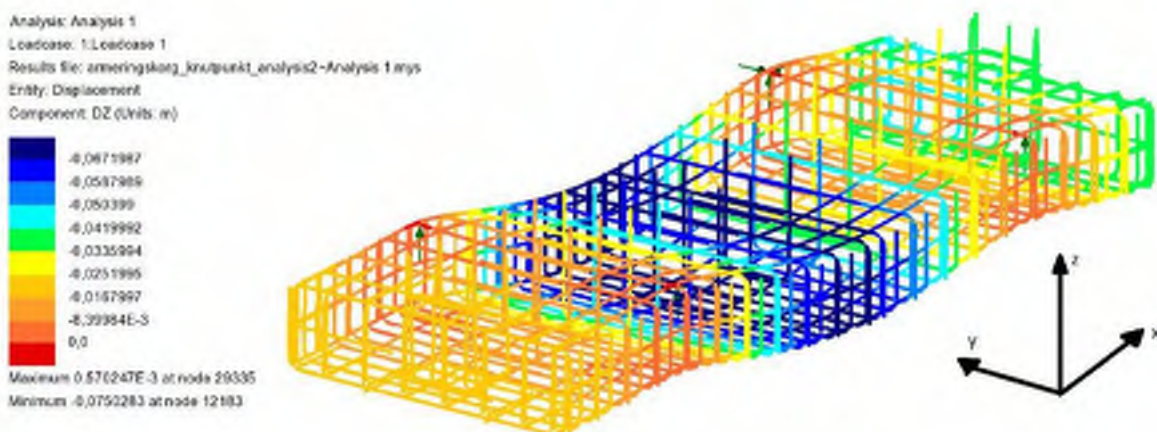


Figure 28 The rebar cage showed with contours of maximum deformation in vertical direction

Figure 28 shows the contours for the direction that has the highest critical deformation which occurs in vertical direction (global z-direction).

5.3.2 Maximum stress in rebars

Table 7 Maximum stress ($\sigma_{Sx(Fx,My,Mz)}$) in the rebars at the lifting point

Maximum stress in rebars
$\sigma_{Sx(Fx,My,Mz)}$ (MPa)
356,0

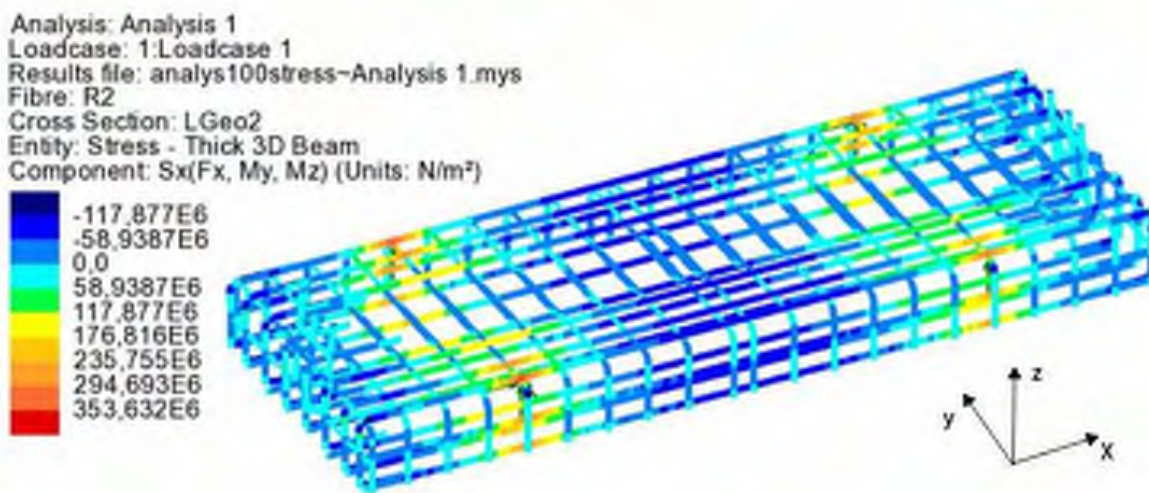


Figure 29 Rebar cage showed with contours of stress σ_{Sx} showing the rebars with the highest stress values

The stress in this analysis is a summary of the stresses due to the force in x, moment in y and the moment in z. Figure 29 shows the contours for the highest stress value for the rebars and Table 7 shows the highest occurring stress value which is at the lifting points.

5.3.3 Maximum forces in joint elements

Table 8 Maximum force for joint elements in local z-, x- and y-direction for joint element with full stiffness capacity

Force and moment			
F_z (N)	F_x (N)	F_y (N)	M_x (Nm)
140,2	144,7	66,0	3,6

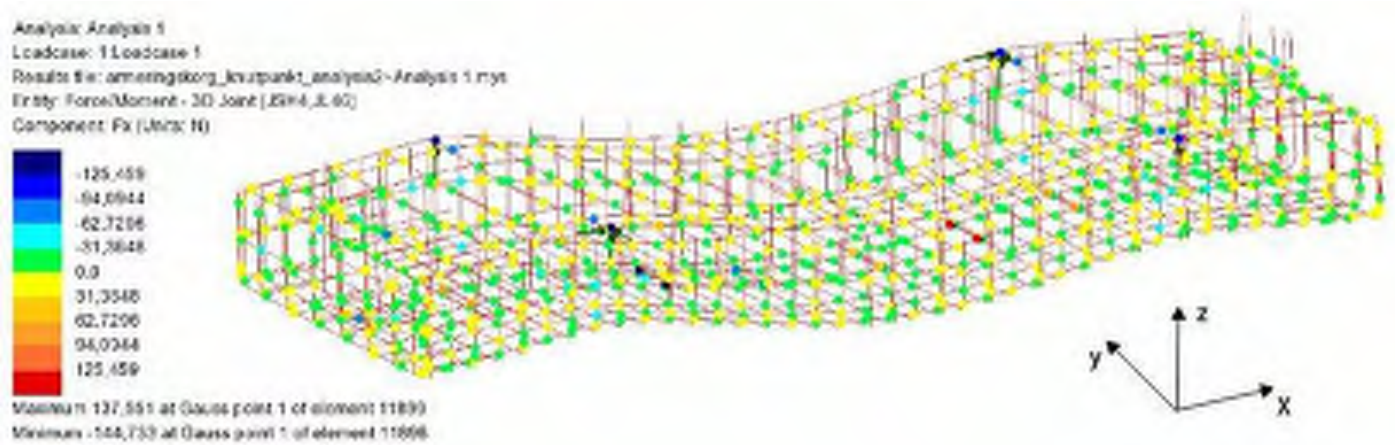


Figure 30 Rebar cage showed with contours of maximum force F_x in joint elements

Figure 30 shows the contours of the joint elements for the case where the force in local x-direction is the highest and Table 8 is a summary of the maximum forces that acts in each local direction.

5.4 Sensitivity Analysis

In this section the results for the sensitivity analysis are shown. This analysis is done with a change of connection stiffness capacity from 100–50% in order to see how the rebar cage acts when the stiffness is changed. Figure 31– Figure 41 displays how the change of connection stiffness affects the different criteria, for more values see tables in Appendix B: LUSAS results sensitivity analysis.

5.4.1 Maximum deformations

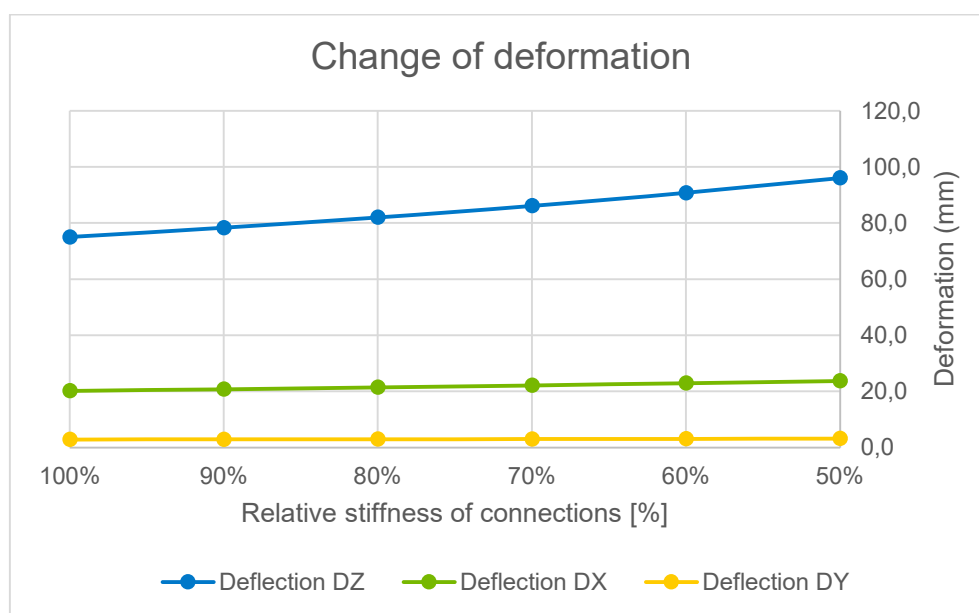


Figure 31 Change of maximum deformation for the rebar cage with different stiffness capacity

As can be seen in Figure 31 the deformations of the rebar cage increase when the relative stiffness of the connections decreases. The horizontal deformations in x- and y direction is relatively small to the deformation change in vertical direction and can almost be seen as constant.

5.4.2 Maximum stress in rebars

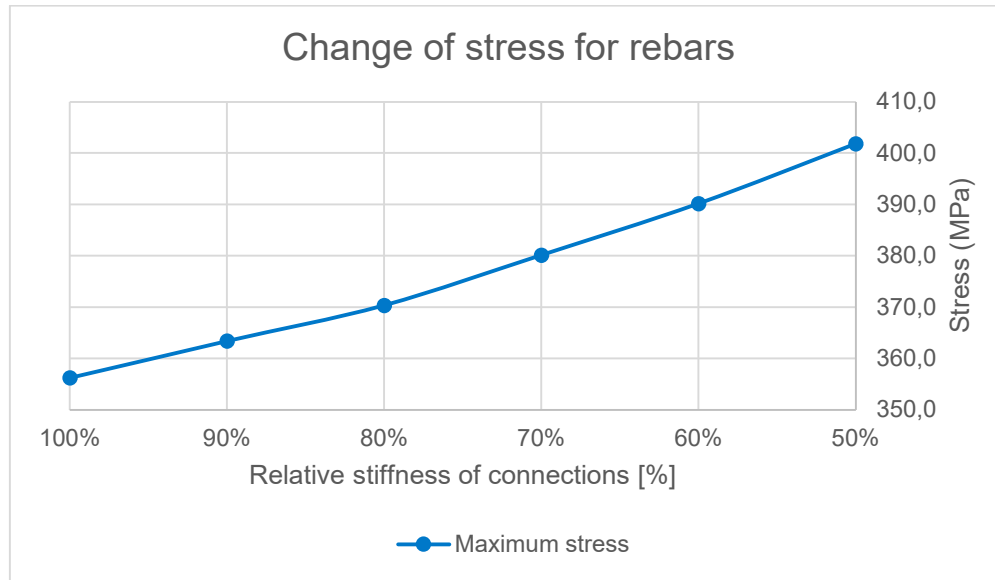


Figure 32 Change of maximum stress ($\sigma_{Sx(Fx,My,Mz)}$) for rebars at the lifting point with different stiffness capacity

Figure 32 shows how the maximum stress $\sigma_{Sx(Fx,My,Mz)}$ in the rebars where the supports are placed increase when the relative stiffness of the connections are reduced.

5.4.3 Maximum force in joint elements

Figure 33–Figure 41 show the change of force and moment in the different joint elements explained in section 4.1.3. For joint element K_{B3} , $K_{C3,8}$ and $K_{C4,5}$ the moment is zero and therefore no diagram is displayed for these cases. For more values see Appendix B: LUSAS results sensitivity analysis.

In Figure 33–Figure 34 change of force in the joint element K_{A1} can be seen. Joint element K_{A1} is the only joint element in connection type A. This specific joint element is located where the lifting points are placed.

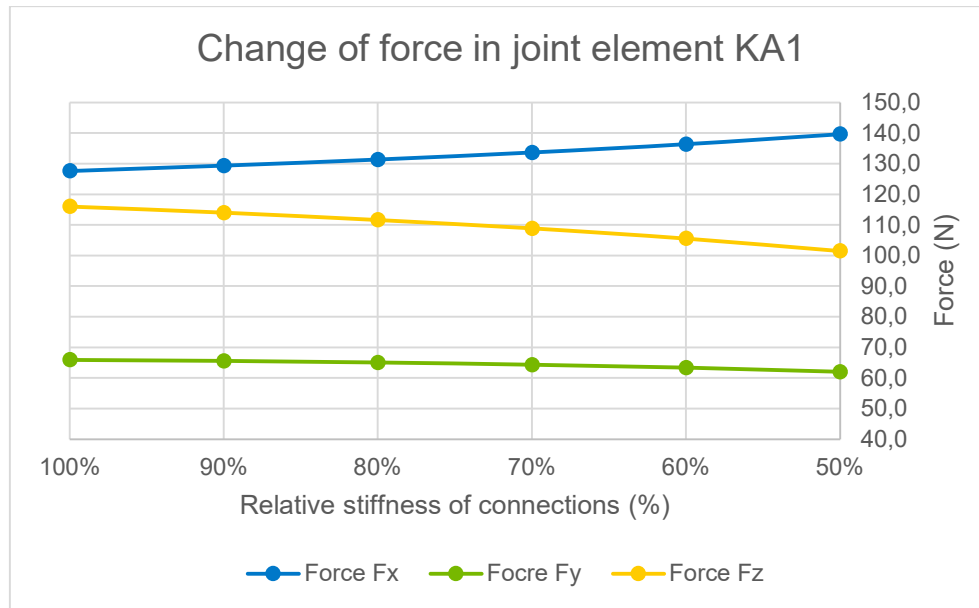


Figure 33 Change of force in joint element K_{A1}

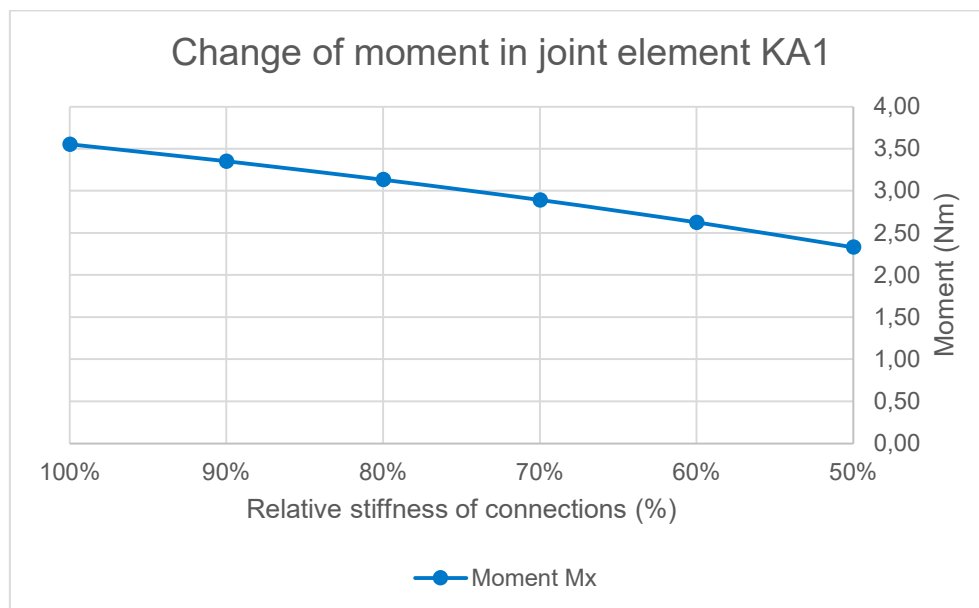


Figure 34 Change of moment in joint element K_{A1}

In Figure 35 and Figure 36 the change of force in joint element K_{B1} and K_{B2} can be seen. In connection type B there is 3 joint elements that simulates on connection. K_{B1} and K_{B2} take all the rotational force meanwhile K_{B3} work together with K_{B1} and K_{B2} to handle the translational forces. Forces in K_{B3} can be seen in Figure 37. These elements are placed in the middle bottom of the rebar cage.

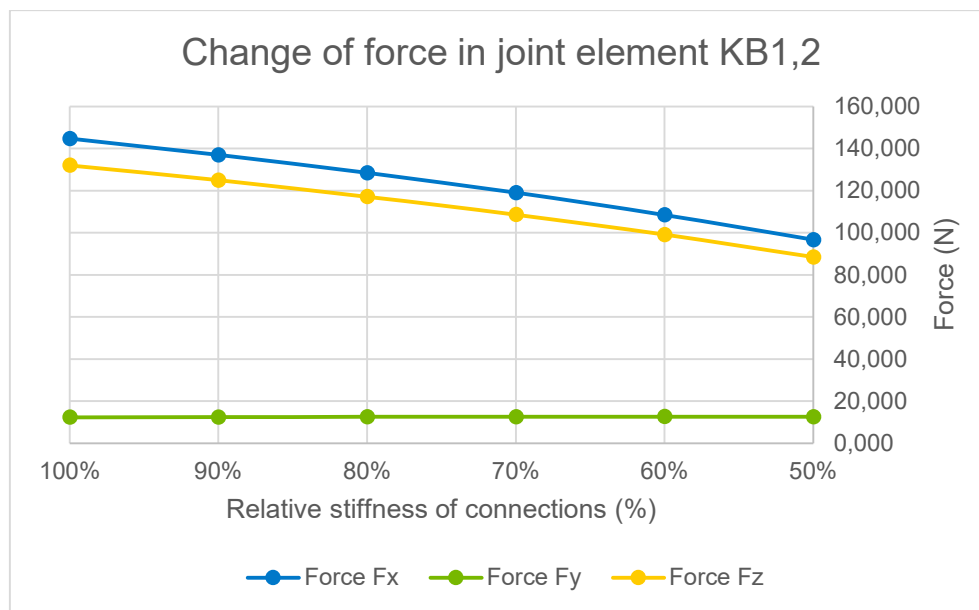


Figure 35 Change of force in joint element $K_{B1,2}$

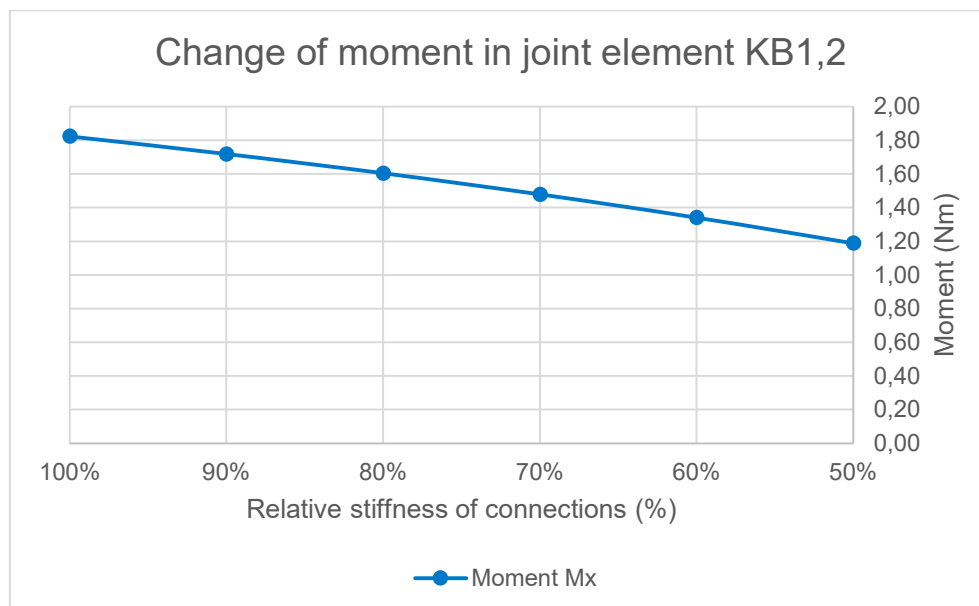


Figure 36 Change of moment in joint element $K_{B1,2}$

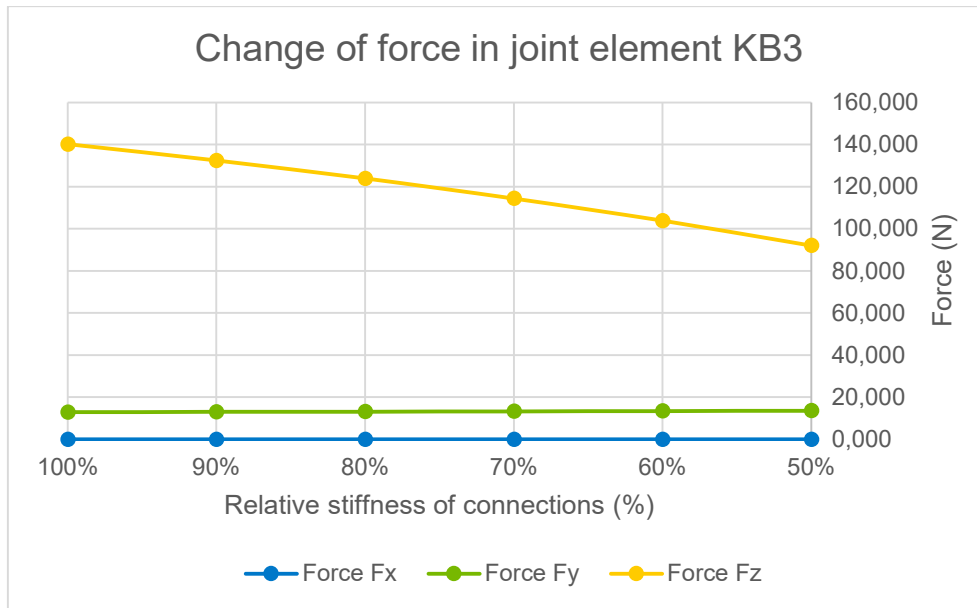


Figure 37 Change of force in joint element K_{B3}

In Figure 38 and Figure 39 the change of force in joint element $K_{C1,2,6,7}$ can be seen. In connection type C there are eight joint elements that simulates one connection. $K_{C1,2,6,7}$ take all the rotational forces meanwhile $K_{C3,8,4,5}$ work together with $K_{C1,2,6,7}$ to handle the translational forces. Forces in $K_{C3,8}$ can be seen in Figure 40 and Figure 41 show forces in $K_{C4,5}$. These elements are located in the outer corners of the rebar cage.

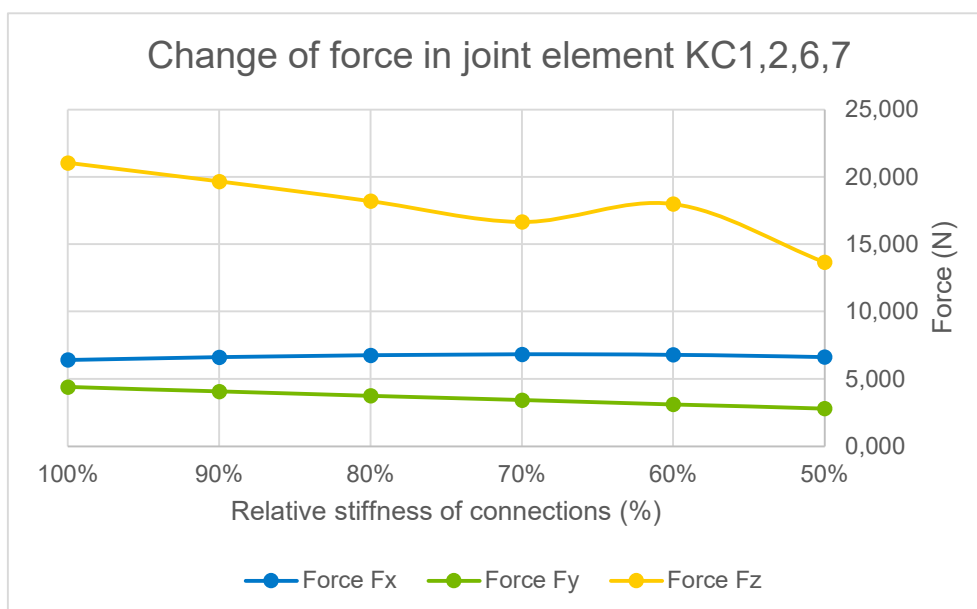


Figure 38 Change of force in joint element $K_{C1,2,6,7}$

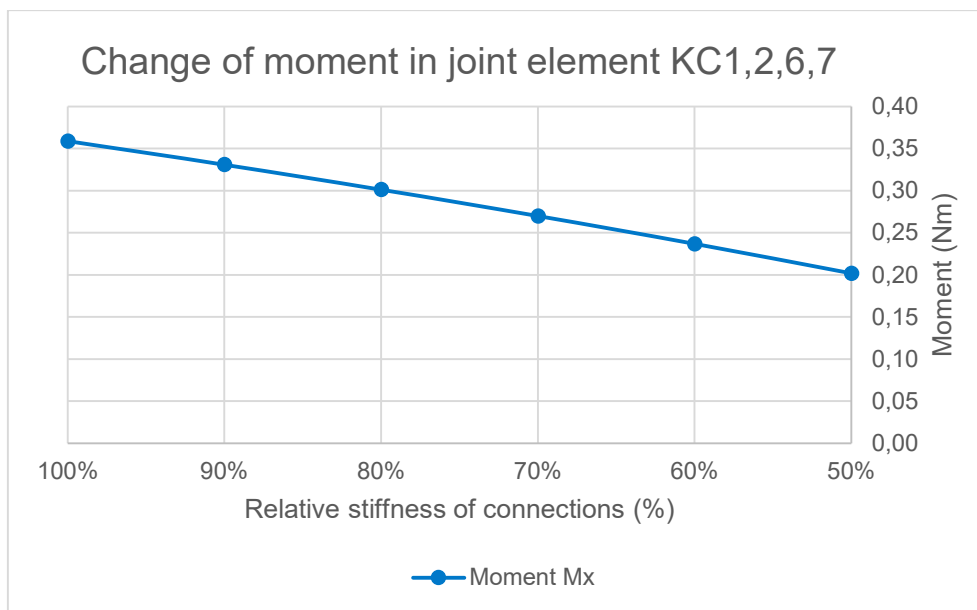


Figure 39 Change of moment in joint element $K_{C1,2,6,7}$

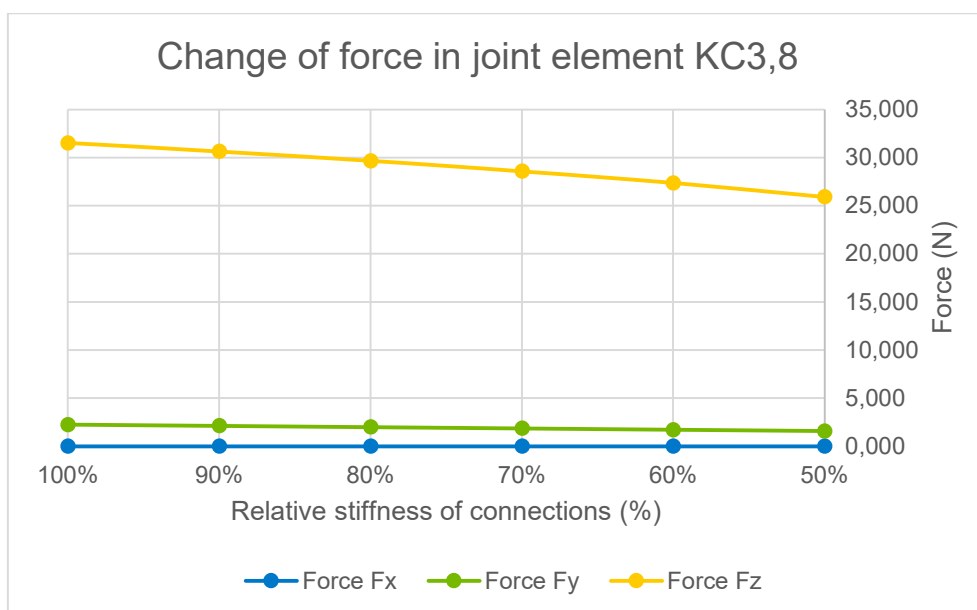


Figure 40 Change of force in joint element $K_{C3,8}$

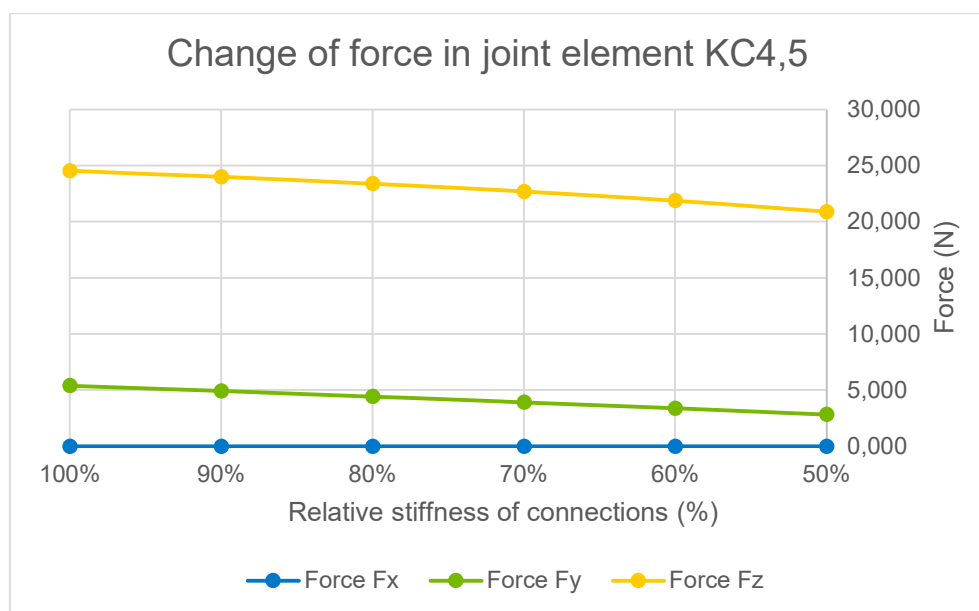


Figure 41 Change of force in joint element $K_{C4,5}$

6 Analysis

6.1 *The general integration problems between Tekla and LUSAS*

6.1.1 *Geometry*

Serval issues while creating the geometry in the numerical model with data from the geometrical model were shown in the survey (4.1.1). Two main problems were discovered with the geometrical data collected from Tekla. The geometric data exported from Tekla are coordinates which describes the rebars. The coordinates describe the rebars with two end nodes for A-bars and the B/C-bars are described with nodes at each end and one node in the center of the arch. This becomes an issue with the B/C-bars when describing them with this data in LUSAS because the arches will not be described. Instead, the rebars will be represented with perpendicular corners. This simple way of describing the rebars will lead to incorrect stress levels in the corners of each B/C-bar since the perpendicular corners will generate higher stress then arches. To get an accurate numerical model the coordinates need to describe the rebars with arches and not perpendicular corners.

The other main issue with the data from Tekla showed in the survey (5.1.1.2) is the intersection points that are positioned in the intersection between each rebar. Theses intersection points are not described in the coordinates exported from Tekla. The rebars are not intersecting each other in the same coordinate for both rebars because the rebars are positioned with a small distance apart. This means that for each intersecting point the coordinates need to be described as two nodes one positioned on each bar. When importing the geometrical data in to LUSAS the intersection points need to be described in coordinates.

The lack of information contained in the geometrical data from Tekla makes it necessary to process the data before it is imported to LUSAS. The processing will generate coordinates which describes both the arch in B/C-bars and the intersection points on each rebar. A suggestion on how to solve the issue concerning the use of geometrical data from Tekla when creating the geometry in the numerical model in LUSAS is shown in Figure 42.



Figure 42 Improved process to create geometry in LUSAS with data from Tekla

The main purpose with the workflow in Figure 42 is the processing of the coordinates which will lead to more detailed information about the geometry. The processing will result in coordinates which describes the B/C-bars in a more detailed way and describes the intersection points for all rebars. The processing of the coordinates needs to be done in several steps to be able to generate the information. Figure 43 describes a suggestion on how the processing of the coordinates can be executed.

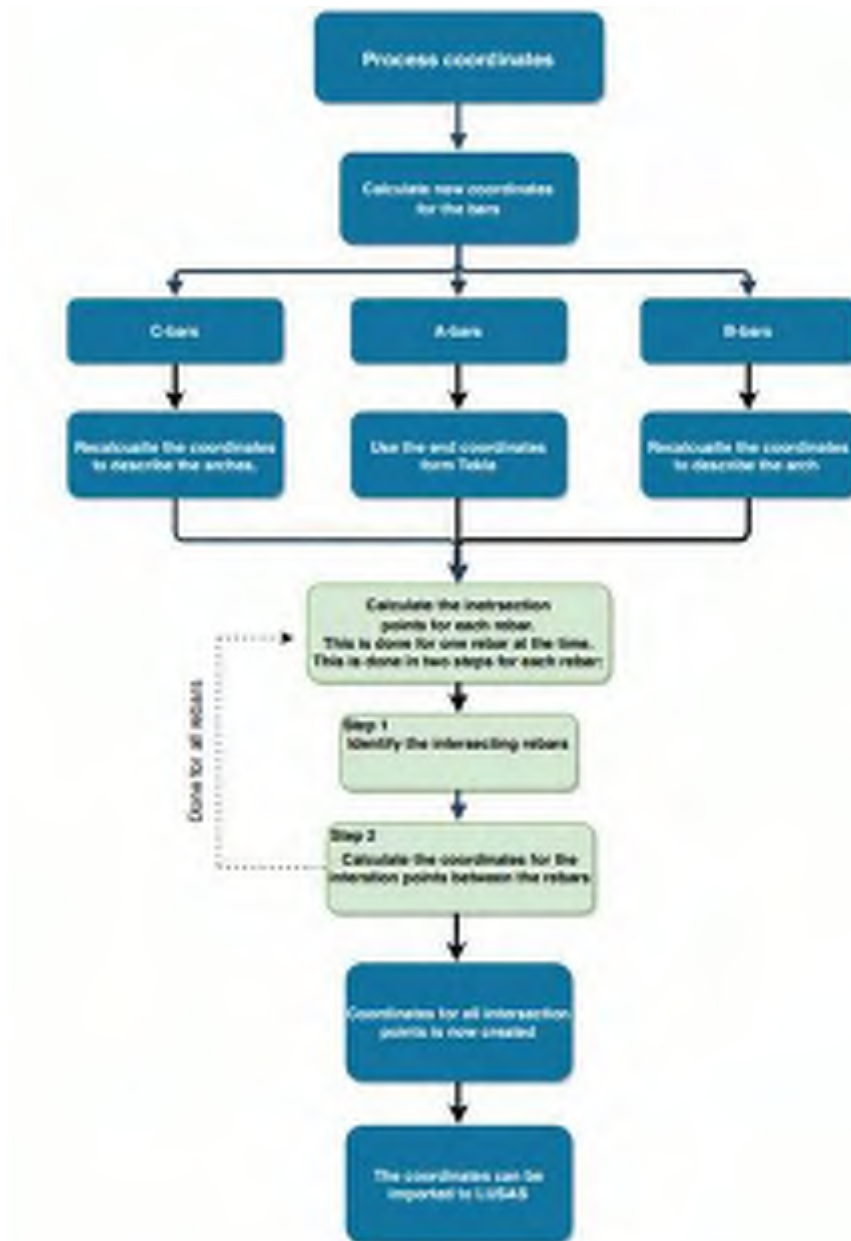


Figure 43 Workflow for processing the coordinates

Each step in the processing is described below:

- **Calculating new coordinates for the rebars:**

- **A-bars**

The coordinates for the A-bar does not need to be recalculated because the rebars are straight and are described with two end nodes.

- **B-bars**

New coordinates is calculated to describe the B-bar in a more accurate way with the arch included. With the original data from Tekla the rebars are described with two end nodes and one node in the center of the arch see Figure 44. This generates a rebar which has a perpendicular corner. Recalculations of the coordinates generate a rebar which are described with one vertical and one

horizontal bar with two end nodes each and one arch between the end of these see Figure 44.

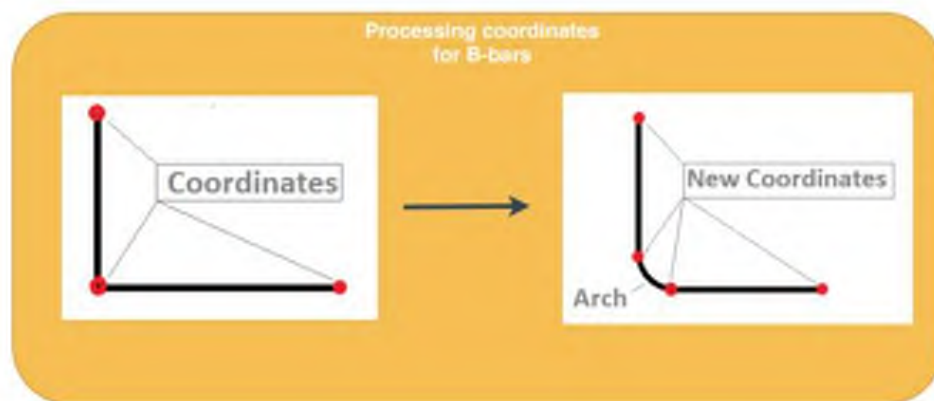


Figure 44, Processing of B-bar coordinates

- **C-bars**

New coordinates need to be calculated to describe the C-bar in a more accurate way with the arch included. With the original data from Tekla the C-bars are described with two end nodes and two nodes one in the center of each arch which will generate perpendicular corners see Figure 45. Recalculations of the coordinates will generate a rebar which is described as two vertical bars and one horizontal bar each with two end nodes and two arcs between the two vertical rebars and the horizontal rebar see Figure 45.

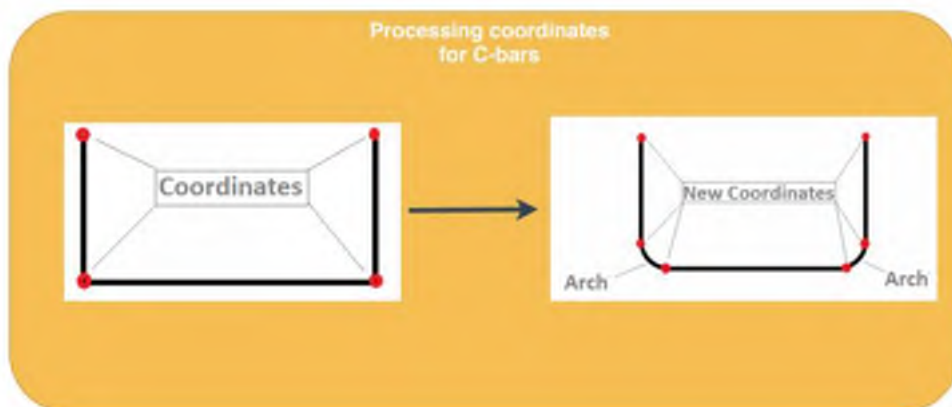


Figure 45, Processing of C-bar coordinates

- **Identify the intersecting bars:**

Each rebar is intersected by one or several rebars and all the intersection points need to be positioned with nodes one on each bar in the intersection. The intersecting bars need to be identified for each rebar to be able to calculate the intersection nodes. This identification is done manually.

- **Calculate the intersection point:**

The rebars that are intersecting are identified in the earlier step and the coordinates for the intersecting point need to be calculated. The rebars are described as a scalar with the

two end points known and by calculating the closest distance between the intersecting bars it is possible to give the exact position of the intersecting point and describe it with coordinates. One coordinate on each rebar in the intersection.

- ***Processed coordinates***

The processed coordinates will contain the information of detailed B/C-bars and nodes on each bar for the intersecting points. These coordinates can be imported to LUSAS to get the final geometry.

The final step to create the geometry for the rebar cage with the processed data from Tekla is to import the new coordinates to LUSAS. LUSAS will create a node in each specific coordinate and beam elements can be created between these nodes. This results in each bar described with several nodes that will represent the intersection points and then two end nodes see Figure 46. Beam element is created between the nodes that belong to a specific rebar. This results in a complete geometry with all rebars described correctly and with all intersection points included.

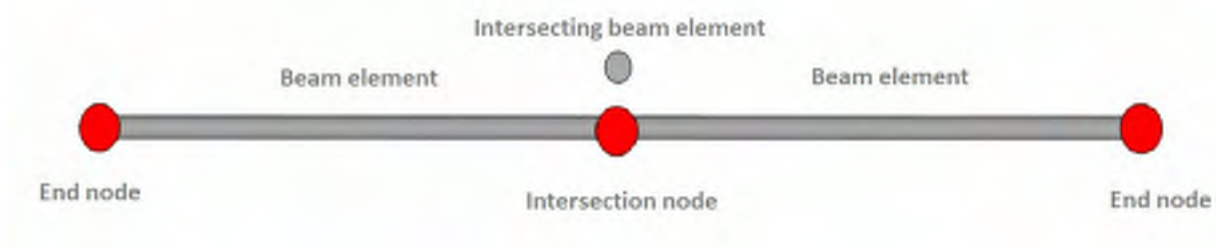


Figure 46, How the rebars are created with beam elements and nodes

6.1.2 Material and Cross section

In the numerical model in LUSAS the material properties and cross section area for each rebar need to be specified. The survey showed some issues with the material properties and cross-section area from Tekla. The geometric model in Tekla describes the cross-section area and the material properties for each bar with text. The numerical model uses parameters to describe the cross-section area and material properties. Due to the issue with the different ways of describing the properties it is not possible to import the information automatically to LUSAS. This issue is mainly a software problem and can be solved with better integration between these software's. Until the integration is more advanced the properties can be transferred by hand in an efficient way.

Transferring the material properties for each rebar is an easy task since the rebars in the cage often have the same material properties or a larger number of bars have the same properties. For the case investigated in this thesis all the rebars has the same material properties. The material properties are specified by assigning the right properties to all rebars simultaneously in LUSAS.

Transferring the cross-section area for the rebars is also easily done by hand. However, this type of properties can be different for different rebars and for the cage investigated in this thesis there are three different cross-section areas. The cross-section area was manually put in to LUSAS by

selecting all the bars with the same cross-section area and then assign the property. This is done three times for this specific cage due to the three different cross-section areas.

6.1.3 Connections

In the geometrical model from Tekla there is no information about how the rebars are connected. This depends on the fact that information of this type is not interesting in a geometrical model of the reinforced concrete because in the end the rebars will be held in place by the concrete. However, the numerical model in LUSAS need information about how the rebars are connected to be able to do the Finite Element Analysis. This information cannot be imported from the geometrical model as described earlier and therefore need to be created in the numerical model.

The connections in the rebar cage are tie wire connections which means semi rigid connections. As mentioned in 4.1.3 the connections are done with elastic spring connection which has a predetermined stiffness in x, y and z, rotational stiffness in x and then free rotation in y and z (4.1.3).

The survey showed multiple issues with modeling the connections for a high number of intersection points simultaneously. This depends on the point mesh which are required for all the connections. The point mesh function in LUSAS creates a discreet element which will represent the spring connecting the rebars. The function creating the point mesh in LUSAS can't create more than one point-mesh simultaneously. The reason for this is that the point mesh is created between the two nodes and the function creates one "Slave" and one "Master" node for the intersection point.

The survey also showed the problem with different types of connections in the rebar cage. The number of different connections depends on how the rebars are tied together for a specific rebar cage. In the case investigated in this thesis there are three different types of connections (4.1.3). The workflow in Figure 47 is a suggestion on how to solve the issue with creating the connections.

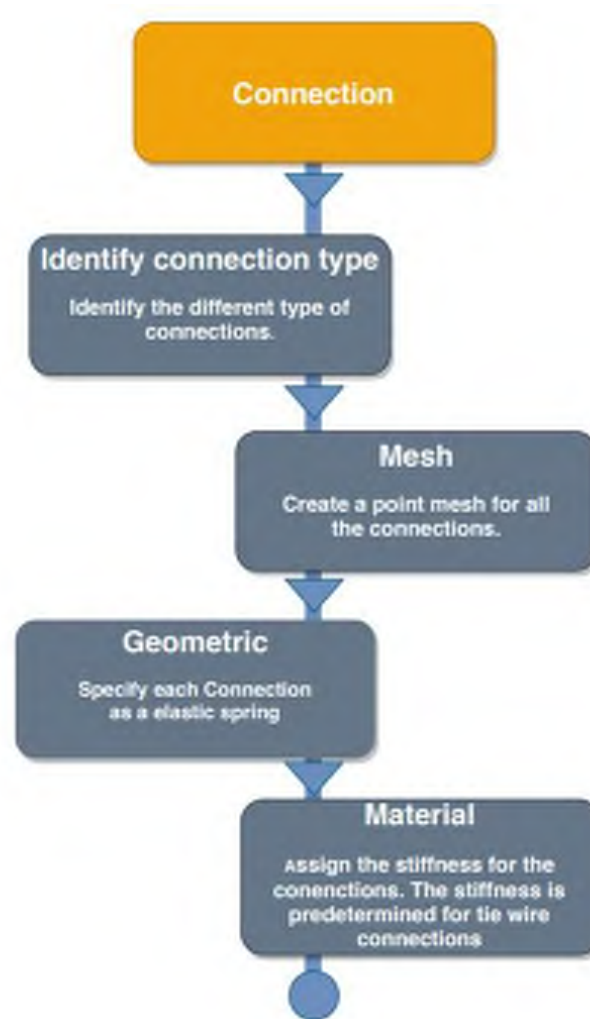


Figure 47 Improved process to model connections in an rebar cage

- **Identify the connection type:**

The first step is to identify the different types of connections. This part is important to be able to create the accurate connection type with elastic springs in LUSAS for each type of connection. The identification needs to be done manually to be able to tell LUSAS which type of connection that should be create for different cases. It is possible to have several different connection types. These types depend on the number of rebars tied together in the one connection. In this case there are three types of connections. Type A with only two rebars tied together, Type B, with three bars tied together and Type C with four bars tied together (4.1.3).

- **Mesh**

The point mesh is required for all intersection points and is a software issue since “point-mesh” function in LUSAS can’t mesh more than one connection at the same time. The mesh function in LUSAS can’t mesh different types of tie wire connections either. For example, in this case there is three different types. Type A, which is meshed between two nodes, Type B is meshed between four nodes which results in three elastic springs shown in 4.1.3 and Type C which is meshed between eight nodes which will result in

eight different springs shown in 4.1.3. Figure 48 shows suggestions of which parts in the “point-mesh” function in LUSAS that need to be added to be able to mesh a high number of different connections simultaneously.

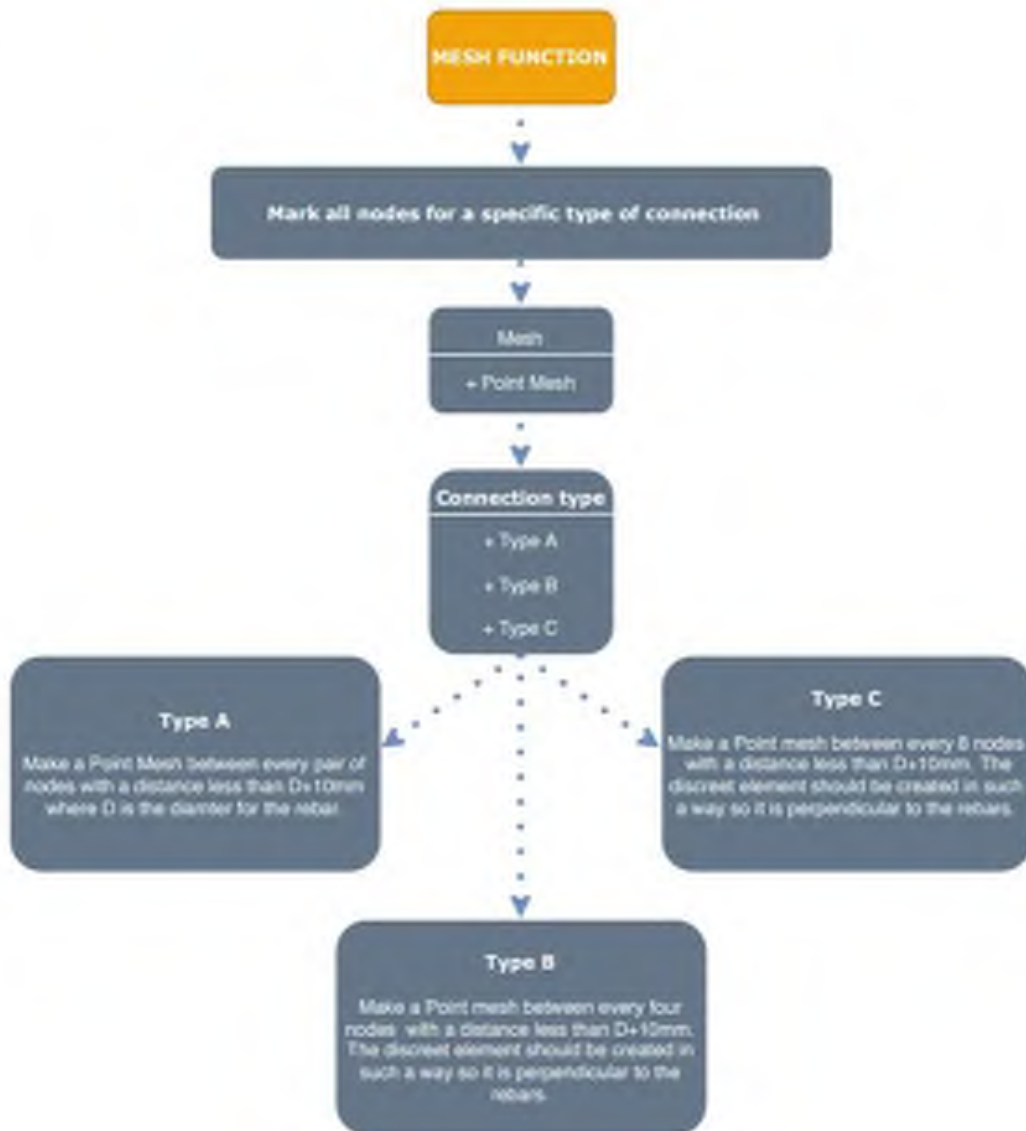


Figure 48 Suggestions on how to improve the mesh-function in LUSAS.

Figure 48 shows which parts of the function in LUSAS that should be added to be able to point mesh the connections for the rebar cage in an efficient way. To make the point-mesh function work for several connections simultaneously the function needs to know which of the chosen nodes are connected to which. If you choose to create a point mesh to several nodes that belongs to different connections the function needs to have a condition to know which nodes that belong to the same connection.

The conditions are described for the different connection types:

Connection Type A: When all nodes for connection type A are chosen the function should create the joint element between the connected nodes with a point mesh. The function should create the discrete joint element with a distance condition. The condition state that if a pair of nodes are located with a distance less than $D+10$ mm, where D is the diameter of the rebar and 10 mm compensate for eventual margin of error, the nodes belong to the same connection. If more than two nodes are located in the distance of $D+10$ mm it isn't a Type A connection, and no connection is created for these cases. This type of connection is shown in Figure 15.

Connection Type B: When nodes for connection type B is chosen the function should create the joint element between the three nodes belonging to the same connection. The function determinates if the nodes belong to the same connection using a distance condition. The condition state that if four nodes are located with a distance less than $D+10$ mm, where D is the diameter of the rebar and 10mm compensate for eventual margin of error, the nodes belong to the same connection. If more than four nodes are located in a distance of $D+10$ mm it isn't a Type B connection. The function creates a connection between theses nodes that belong to Type B with three discrete joint elements which are created perpendicular to the rebars. This type of connection is shown in Figure 17.

Connection Type C: When nodes for connection type C is chosen the function should create the joint element between the nodes that belongs to the same connection. The function determinate if the nodes belong to the same connection by a distance condition. The condition state that if eight nodes are located with a distance less than $D+10$ mm, where D is the diameter of the rebar and 10 mm compensate for eventual margin of error, the nodes belong to the same connection. The function creates eight discrete joint elements between these eight nodes and the elements should be created perpendicular to the rebars. This type of connection is shown in Figure 19.

- **Geometric**

A Geometric property need to be assigned to all the connection element to create the elastic spring. This process is easily done by choosing all the connections in the cage and assign the elastic spring. Because the springs have local coordinates it does not matter in which way the spring is located and the type of connections does not matter.

- **Material**

The material specifies the stiffness for the spring in 6 degrees of freedom. The issue when assigning material properties is that the properties for the elastic springs depends on the connection type. As described in 4.1.3 the connections were assumed to be acting semi rigid with stiffness in the translational degrees x , y and z , rotational stiffness in x and the

free rotation in y and z. The issue with this is when to assign the material properties to the type B and C because this type of connection is modeled with three respectively eight springs. This means that the total stiffness for the springs in one connection needs to be equal to the stiffness for one connection in all degrees of freedom explained in 4.1.3.2 and 4.1.3.3. Figure 49 is a suggestion how the function in LUSAS can act to solve the problem when assigning the stiffness for the connections.

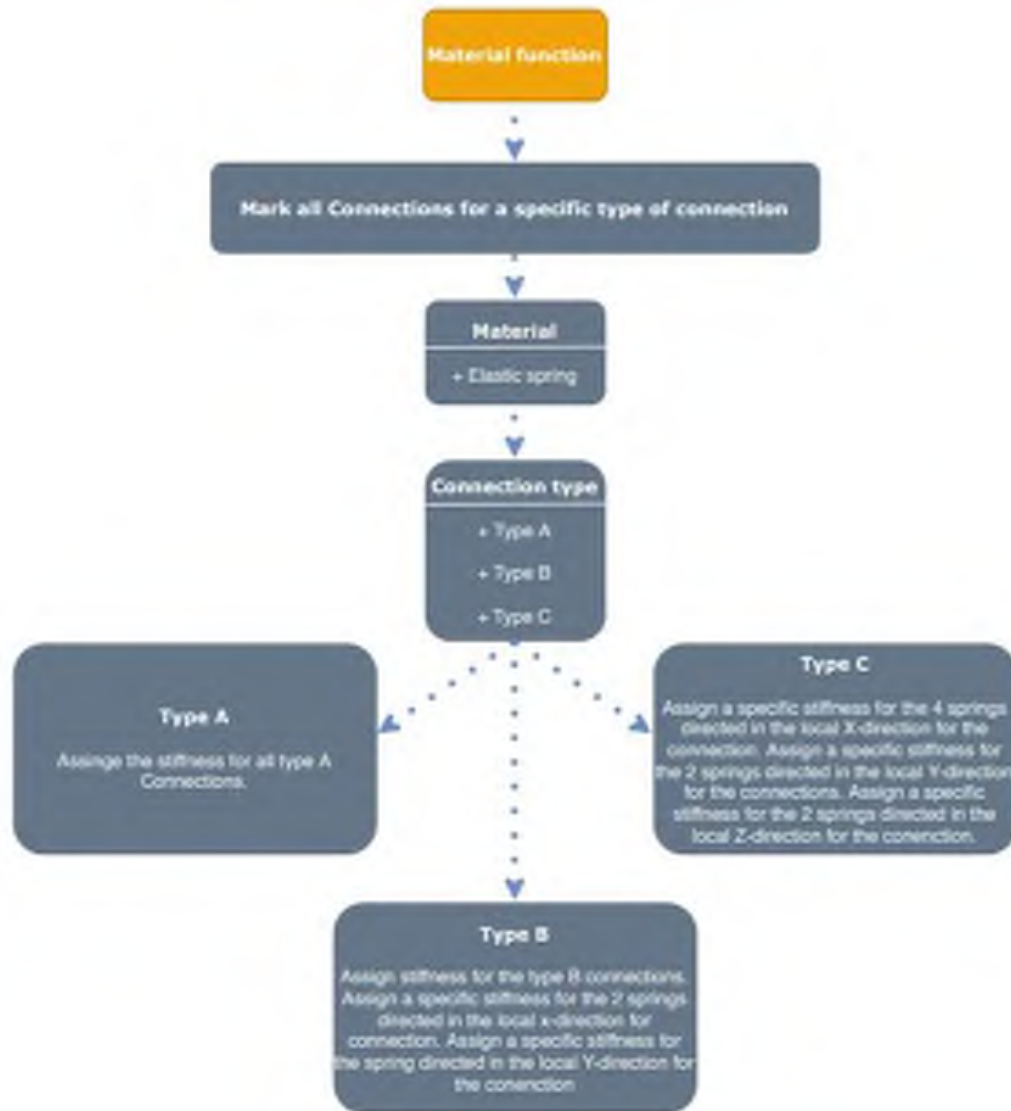


Figure 49 Suggestion on how to assign material properties for different connection types.

Figure 49 describes how the material properties for the springs are assigned for the different type of connections. Because type B and C consists of more than one spring, but should be seen as one connection, the total stiffness matrix for all the springs needs to be equal to the total stiffness matrix for one connection. Therefore, the function to assign the material properties in LUSAS needs to know which type of connection the material is assigned to and assign the correct stiffness for the different springs in the connection.

Figure 49 describes how material properties should be assigned to different types of connections.

6.1.4 Load case and support

The survey shows that there are no problems with the process for the load case and support for this project. The process for the load case and supports is an iteration process where changes can be done in a simple way. The lifting points need to be placed in such a way so that the rebar cage can be lifted.

6.2 Finite Element- and Sensitivity- Analysis

The following criterions from section 4.1.5 was chosen to determine if it is possible to lift the rebar cage: (1) The stress cannot exceed the yield limit at 435 MPa for the rebars, (2) the forces in the joint elements cannot exceed the connection strength.

6.2.1 Deformations for the rebar cage

The results from section 5.3.1 shows that the maximum deformation will occur in the middle of the rebar cage in the vertical-direction (z) with a value of 75,0 mm and the horizontal deformation in x- and y-direction is almost neglected in comparison to the vertical-direction (z). It is difficult to determine if a deformation of 75,0 mm is critical or not since this value will depend on the length between the lifting points. In this study the distance between the lifting point is 2,76 m and the given maximum deformation will give a deformation/length quota of 0,027. In order to use this criterion a number of tests need to be performed on several rebar cages to evaluate a guideline for what the maximum deformation/length quota should be.

The results from the sensitivity analysis in section 5.4.1 shows that a decrease in connection stiffness does not affect the deformation of the rebar cage considerably. When the stiffness is decreased from 100% to 50%, the change of vertical deformation increases in z-direction with 28,1 % (21,1mm), horizontal deformation increases in x-direction with 17,8 % (3,6 mm) and in y-direction 10,3% (0,3 mm).

6.2.2 Maximum stress for the rebar cage

Instead of looking at the deformation the maximum stress of the rebars can be analyzed to see if some of the rebars reach the yield limit of 435 MPa which occurs at a stress level 435 MPa. Figure 29 shows that with full connection stiffness the maximum stress occurs at the lifting points with a stress of 356 MPa which gives a utilization of 81,8%. Figure 32 that when the connection stiffness decreases the stress increases, this is due to the fact that when the connection stiffness decreases it makes it harder for the connections to transfer the force evenly to the rebars. The highest stress can be found when the connection stiffness is at 50% with a stress of 402,0 MPa and a utilization of 92,4% which is an increase of 10,6%. With these results it can be stated that criterion (1) is satisfied even with a connection stiffness of 50%. The high stress levels in the corner of the rebars can be due to a numerical effect within the program due to the chosen mesh

type and size. Refining the mesh size in a FE-model will increase the stress and one way is to have a very fine mesh size and use an average stress value to determine the stress level. Another reason for the high stress levels could also be that the rebars where the lifting points are located are of shape-b which means that those are more prone for bending which leads to a moment in the corners which lead to higher stress.

6.2.3 Maximum force in joint elements

Another criterion that must be fulfilled is that the force acting on the joint elements cannot exceed the design strength of the connection. The connection design strength for a snap tie is shown in Table 1. This strength is for a type A connection that has one joint element. For a type B connection that has three joint elements the translational strength has to be divided by three and moment by two according to 4.1.3.2. For a type C connection the strength has to be divided by six and the moment by four according to section 4.1.3.3 in order to get a value that can be compared to the results from section 5.4.3 that shows the maximum force in a single joint element.

Table 9-

Table 11 display the maximum force that acts on a single joint element associated with its connection type with connection stiffness 100%. The results show that neither connection type A, B or C are exposed to forces higher than the design value for the connections and that the highest utilization rate reaches 35,2% at most in connection type B in the local z-direction.

Table 9 Connection strength and maximum forces acting in a type A connection with connection stiffness 100%

Tie Wire Connections Strength for connection type A			
F_{xRd} (N)	F_{yRd} (N)	F_{zRd} (N)	$M_{x,Rd}$ (Nm)
1356,7	1196,6	1196,6	25,2
Maximum calculated force for connection type A			
F_{xEd} (N)	F_{yEd} (N)	F_{zEd} (N)	$M_{x,Ed}$ (Nm)
127,6	66,0	116,0	3,6
Utilization (%)			
9,4	5,5	9,7	14,3

Table 10 Connection strength and maximum forces acting in a type B connection with connection stiffness 100%

Tie Wire Connections Strength for connection type B			
F_{xRd} (N)	F_{yRd} (N)	F_{zRd} (N)	$M_{x,Rd}$ (Nm)
452,2	398,9	398,9	12,6
Maximum calculated force for connection type B			
F_{xEd} (N)	F_{yEd} (N)	F_{yEd} (N)	$M_{x,Ed}$ (Nm)
144,7	12,9	140,2	1,8
Utilization (%)			
32,0	3,2	35,2	14,3

Table 11 Connection strength and maximum forces acting in a type C connection with connection stiffness 100%

Tie Wire Connections Strength for connection type C			
F_{xRd} (N)	F_{yRd} (N)	F_{zRd} (N)	$M_{x,Rd}$ (Nm)
226,1	199,4	199,4	6,3
Maximum calculated force for connection typ C			
F_{xEd} (N)	F_{yEd} (N)	F_{zEd} (N)	$M_{x,Ed}$ (Nm)
6,4	5,4	31,5	0,4
Utilization (%)			
2,8	2,7	15,8	6,4

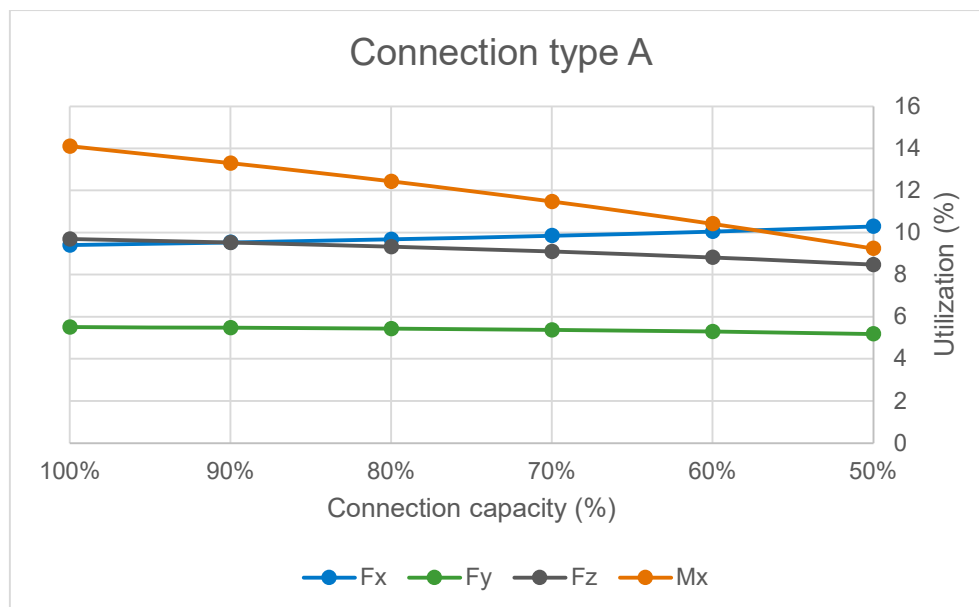


Figure 50 Utilization summary of connection strength for the type A connection with the highest load at each connection stiffness

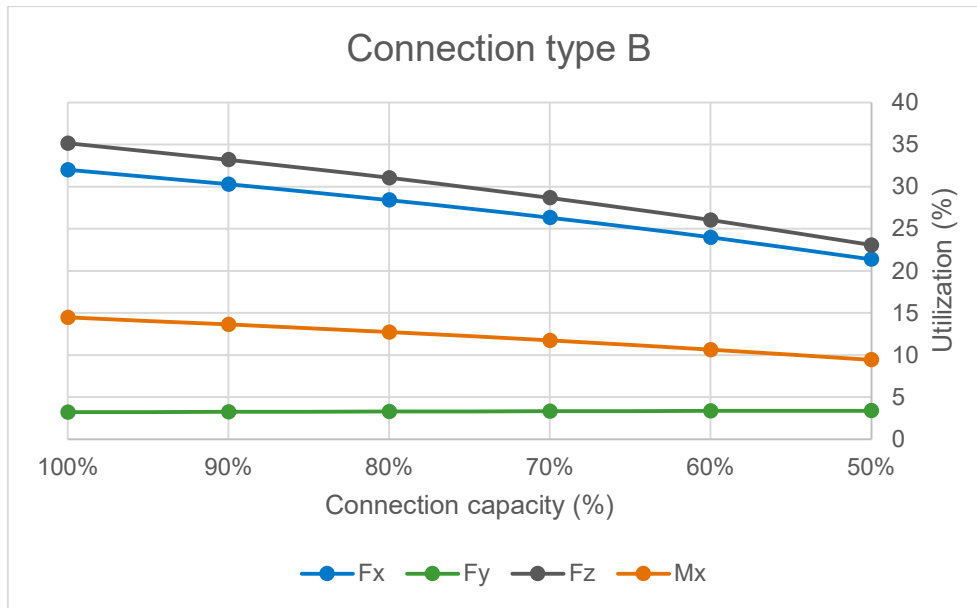


Figure 51 Utilization summary of connection strength for the type B connection with the highest load at each connection stiffness

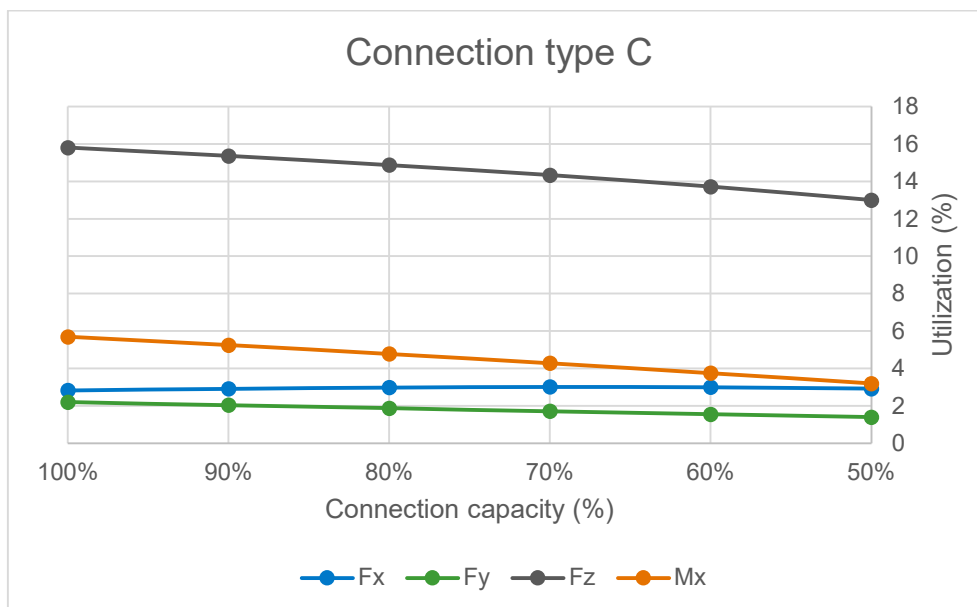


Figure 52 Utilization summary of connection strength for the type C connection with the highest load at each connection stiffness

In Figure 50-Figure 52 the utilization for force and moment can be seen for connection type A, B and C at each connection stiffness. See Appendix B Table B 9-Table B 20 for more information. What can be seen from Figure 50-Figure 52 is that for most cases the utilization is either decreasing or is almost constant except for the force F_x in connection type A where it increases with a few Newtons. The case where the utilization decreases, it is due to the fact that when the connection stiffness is reduced the rebars will take more of the load instead as mentioned in 6.2.2 and the rebars will reach a higher stress level. In the case where the utilization is increased the point where the maximum force F_x is located is near the lifting points and therefore is the utilization increased. The results from Figure 50-Figure 52 shows that none of the connections reach the limit for the connection strength.

What can be seen from the analysis is that the rebar cage can be lifted when using four lifting points placed as mentioned in 4.1.1 Neither criterion (1) or (2) is exceeded and the deformations are not unrealistic. It can also be seen that when the stiffness capacity decreases down to 50% it is still possible to lift the rebar cage, but the stress utilization rate will be at 92,4%.

7 *Discussion and conclusions*

7.1 *Discussion*

In this thesis the integration between Tekla and LUSAS together with the behavior of the tie wire connections and how these should be modelled were investigated. It was also investigated if the specific rebar cage could be lifted. This project was carried out with a literature study together with the survey while creating the Finite Element Model and then performing the Finite Element Analysis.

The literature study was carried out to show some general problems with the integration between CAD and CAE and to investigate the behavior and stiffness/strength of the tie wire connections. One of these general problems for CAD and CAE integration is the amount of details in the geometrical model. Since geometrical models are most commonly used for visualization, they contain a lot of details which are not necessary in a numerical model (2.2.2). During the process of creating the numerical model in this thesis shows that these general problems described in the earlier research isn't an issue in the case for rebar cages. For the actual integration problem in this thesis the amount of details does not need to be taken into consideration since models of rebar cages lack that high amount of details. Earlier research also shows problems with models that has no connection between CAD and CAE. This means that if changes are done in the CAD model, they are not shown in the CAE model (2.2.2). The reason why integration between CAD and CAE is necessary in the project is that the engineer should be able to check if it is possible to lift the rebar cage in the early design process. Therefore, in this case the connection between the CAD and CAE models can be an issue if the analysis shows that the rebar cage isn't stable enough to lift and then need to be redesigned. Then the cage needs to be redesigned in CAD and then the process of creating a numerical model need to be done again. This problem isn't investigated in this thesis due to that it is mainly a software problem.

The literature study also investigated the behavior and strength/stiffness of the tie wire connections. Since a test wasn't carried out and the stiffness and strength values were taken from earlier research, the analysis became uncertain. Also, the tie wires tested in earlier research was not of the same type. However, the stiffness values will give the general behavior of the connections and the analysis together with the sensitivity analysis will show how the rebar cage will behave when exposed to lifting force. Literature about how strong and how tie wire connections behave is limited and near non existing. In this thesis only one report (C Builes Mejia, 2010) was found that contained information about this. The problem with this report is that the results for the strength and stiffness of a tie wire connection are for a connection where only two rebars intersect and in this thesis, there are two other types of connections, B and C. Due to this fact, assumptions had to be made about how the other two types of connections should behave and be modelled in the Finite Element Model. These assumptions can't be verified in this thesis. More physical testing is needed where both connection type B and C is tested so that the connections in the FE-model can be calibrated from the results. Another problem with only one source where the strength and stiffness are mentioned is that the values

can't be compared to others tests to see if they are correct. But despite all this the model gives a good picture of the behavior when the rebar cage is exposed to lifting force and when the connection stiffness is changed.

Since there hasn't been a lot of earlier research for rebar cage models with tie wire connections, it is difficult to find general problems which can be applied to rebar cage models, hence the survey was carried out to find the main integration problems between Tekla and LUSAS for rebar cage models. The suggestions from the result and analysis (6.1 and 5.1.1) on how to create the numerical model with data from the geometrical model based on the integration between Tekla and LUSAS and not the integration problems for other CAD and CAE Software. There are some other critical problems to be solved before been able to apply a functional integration between CAD and CAE for the type of models in this thesis. One of the general problems with the integration is when using the data from the geometrical model. The survey shows that the data from CAD model need to be processed by a calculation software to be able to provide the geometrical information needed for the numerical model (5.1.1.2). This is a problem that are strongly connected to the software's LUSAS and Tekla and how they provide and uses data. The suggestions in the results and analysis are highly adaptive to this two software's and not general for all CAD and CAE software's. However, Skanska Sweden AB uses this two software's when designing and analyzing structures, therefore the results are directed to this specific project. The other critical problem showed in the results is the fact that LUSAS bridge isn't optimized for this type of model where a lot of connections and multiple connection types should be assigned simultaneously. This issue is a software problem where the software needs to be adapted to create rebar cage models in a time efficient way. The analysis shows suggestions on how the function should be optimized to work for this type of models (6.1.3). These suggestions are based on how the functions in LUSAS are working and therefore not adaptive to other Finite Element Software's.

The results from the Finite Element Analysis show that neither the deformations of the rebar cage or the forces in the joint elements are affected in such magnitude that the rebar cage will be unstable when the stiffness of the connections is changed. It is only the stress at the lifting points that is affected and will approach the yield limit. Due to this fact, the design criterion for this case is the stress at the lifting point. Because low connection stiffness results in higher stress in the rebars near the lifting point, therefore low connections capacity should be avoided. But if it is not possible, one way to avoid this would be to place rebars that is not designed to take any tensile forces in the concrete but is mounted in the rebar cage only to handle the lifting forces that work like bracing. As mentioned in the results from Devine et al. (2018) diagonal bracing is more effective to prevent the rebars from shifting rather than increasing the number of tied intersections. If this is used, the number of tied connections could be decreased, and the results overall could be improved. This case needs to be tested before some conclusions can be made and it would be interesting to see an analysis where the number of ties is decreased, and bracing is installed instead.

This study investigates the effects on the rebar cage when the connection stiffness decreases. In the case when the connections stiffness increases the lifting forces will be transferred between the

rebars in a more even way. This would result in a higher amount of rebar taking the lifting force in the rebar cage. The effects when the connections stiffness increases are not investigated in this study and needs further investigation including ensuring that the rebars do not get plastic deformations.

7.2 Conclusions

This study is done to contribute to automation with industrial robots on construction sites. The long-term goal is that it should be possible for the engineer to check if a specific rebar cage with tie wire connections can be lifted in the early design process. The specific aim for this study is to investigate if it is possible to lift a specific rebar cage and how this should be done. This has been investigated with the help of these three research questions:

- (a) How could a numerical model in a structural design software be created with help from a geometrical model?
- (b) How should the tie wire connections be modelled with help from the geometric model and how does the stiffness of the connections affect the behavior of the rebar cage?
- (c) Based on the Finite Element Analysis, is it possible to lift the rebar cage and if so, how should it be done?

(a). The conclusions are that the geometric data from Tekla needs to be processed to be able to create the correct geometry in LUSAS. This processing is done in several steps to create the correct geometrical information shown in 6.1.1. The function for generating the connections in LUSAS needs to be optimized so it is possible to create several different connections with elastic springs simultaneously. The optimization for the function should be done by adding several options shown in 6.1.3.

(b). The conclusions for the tie wire connections are that these can be modeled as elastic springs with 6 degrees of freedom and each node can rotate freely in two directions, θ_y and θ_z . When there is more than one rebar that intersect in a connection the tie wire connection is modeled with a number of springs that act together. For connection type B where three rebars intersect there will be three spring elements and for type C where four rebars intersect there will be eight elastic spring elements acting together.

The sensitivity analysis showed that when the connection stiffness was decreased with 50% the vertical deformation increased with 21,1 mm and the utilization for the rebars with respect to the stress level increased with 10,6%. When looking at the strength of the connections their utilization grade decreased when the connection stiffness was reduced since the connections need a high stiffness in order to transfer forces more evenly throughout the rebar cage. The stiffness in the connections has a very small impact on the behavior of the cage and therefore the placement of the rebars contributes more to the stability.

(c). The Conclusions for the specific rebar cage investigated in this study are that it is possible to lift the cage in four lifting points located at the top of the rebar cage. This conclusion is made from the criteria's that the rebars does not exceed yield limit, the design strength for the connections isn't exceeded and the deformation is checked in order to verify that the rebar cage does not collapse.

8 *Suggestions on further research*

Suggestions for what needs to be investigated further to be able to use this concept in an efficient way are here given. The verification of the model and the integration between LUSAS and Tekla is general problems. The analysis showed that the integration between LUSAS and Tekla does not work in a rigorous way for the concept. The analysis presents some suggestions on how the functions in LUSAS could work to make the process efficient for this type of process. The suggestions presented needs to be integrated in LUSAS and more research on how the process works with the improved function needs to be investigated.

As mentioned, the stiffness values used in the model are taken from tests in earlier research. The tie wire connections from the earlier research only contain results from connections where two rebars intersect, in this thesis there is two other types of connections. Therefore, to be able to verify the connections in a Finite Element Analysis new test for the right connections done by the tying tool Knut39 needs to be done. The test should be done for different connection types where the amount of rebars tied together in one connection is crucial. This will give a more exact value for the connection and generate a more accurate way to model these in the Finite Element Model. To verify the model, it will be necessary to construct a full-scale rebar cage and then do full-scale lifting test to compare with the results from LUSAS.

The analysis done in this thesis does not take into consideration how the connections are reacting to dynamic loads. Therefore, it isn't known how the stiffness for the connections has been affected by the lifting force. For the concept to work, the rebar cage needs to be ready for casting after the lift without any strengthening measures. So further research should be done on the effect of the lifting force to be able to verify that the connections have enough stiffness for the casting.

The conditions to consider the cage liftable is for this thesis based on the material properties for the reinforcement and connection properties. For further research the conditions for the rebar cage should be investigated and guidelines needs to be specified. One recommendation is to investigate conditions for maximum deformations in the rebar cage.

9 Reference

- Alimak. (2021, 11 15). *Alimak industries*. Retrieved from Alimak.com:
<https://alimak.com/Industries/Construction/Alimak-Tower-Crane-Lift-provides-reliable-access-during-construction-of-major-commercial-tower-in-France>
- Altobelli, F. R. (1991). *An Innovative Technology in Concrete Construction: Semi-Automated Rebar Tying*. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology.
- Arabshahi, S., & Barton, D. (1991). Towards integrated design and analysis. *Finite Elements in Analysis and Design*, 9, 271-293.
- Armstrong, C. (1993). Modelling requierments finte-element analysis. *Computer Aided Design*, 26, 573-578.
- Augusta, M. N., Amaro, A., Roseiro, L., Crine, J., & Rogerio, L. (2015). *Engineering computation of structures; The Finite Element Method*.
- BE GROUP. (2021, 11 17). *BE GROUP*. Retrieved from Typblad för bockning:
<https://www.begroup.se/produkter/armering/>
- C Builes Mejia, J. (2010). *Stability of bridge column rebar cage during construction*. University of Nevada, Reno.
- Cuikrière, J.-C., & Francois, V. (2014). Intgration of CAD, FEA and Topology Optimization through a Unified Topological Model. 11, pp. 493-508.
- Devine, R., Barbachyn, S., Thrall, A., & Kurama, Y. (2018). Effect of Tripping Prefabricated Rebar Assemblies on Bar Spacing. *Journal of construction engineering and management*, 144(11).
- Dolinsek, B., & Duhovnik, J. (1998). Robotic assembly of rebar cages for beams and columns. *Automation in Construction*, 8(2), pp. 195-207.
- Donaghy, R., MCCune, W., Bridgett, S., Armstrong, C., Robinson, D., & MCKeag, R. (1996). *Dimensional Reduction of Analysis Models*. Belfast: The Queen's University of Belfast.
- Eugenio, O. (2013). *Structual Analysis with the Finite Element Method* (Vol. 2). Barcelona : Artes Graficas Torres S.A.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. (2004). *EN 1992-1-1: Design of concrete structures*. BRUSSELS: EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION.

- Fedorik, F., Heikkilä, R., & Makkonen, T. (2016). Integration of BIM and FEA in Automation of Building and Bridge Engineering. *International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, 33.
- Foucault, G., Cuillière, J.-C., Francois, V., Léon, J.-C., & Maranzana, R. (2008). Adaptation of CAD model topology for finite element analysis. *Computer Aided Design*, 40, pp. 176-196.
- Gujarathi, G. P., & Ma, Y. (2010). Generative CAD and CAE integration using Common Data Model. *Automation Science and Engineering*, 6, pp. 586-591. Toronto: IEEE.
- Hamri, O., Léon, J.-C., Giannini, F., & Falcidieno, B. (2010). Software environment for CAD/CAE integration. *Advances in Engineering software*, 41, pp. 1211-1222.
- Kettil, P. (2012). *Sammanfogning och fixering av armering*. Göteborg: Skanska Teknik.
- Kjellgren, A. (2019). *Fatigue Evaluation of Robot Welded Reinforcement Bars*. Lund: Lund University.
- Labuschagne, A., van Rensburg, N. F., & van der Merwe, A. J. (2009). *Mathematical and Computer Modelling*.
- Lee, S. (2004). A CAD-CAE integration approach using feature-based multi-resolution and multi-abstraction modelling techniques. *Computer-Aided Design*, 37, 942.
- Léon, J., & Fine, L. (2005). A new approach to the preparation of models for FE analyses. 23, pp. 166-184.
- Liu, G., & Quek, S. (2003). *Finite element a Method: Practical Course*. Kidlington Oxford UK: Butterworth-Heinemann.
- LUSAS. (2018). *Modeller Reference Manual*. Kingston upon Thames: LUSAS.
- LUSAS. (2019). *Element Reference Manual*. Kingston upon Thames: LUSAS.
- Olivier, A. H., Beucke, K., Firmenich, B., & Cornelis van Rooyen, G. (2006). *Consistent CAD - FEM models on the basis of object versions and bindings*. Montréal: Joint International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering.
- Park, H.-S., & Dang, X.-P. (2010). Structural optimization based CAD-CAE integration and metamodeling techniques. *Computer Aided Design*, 42(10), pp. 889-902.
- Pettersson, L., Johansson, P., & Svensson, H. (2017). *United states Patent No. 0157664*.

- Relefors, J., Momeni, M., Pettersson, L., Hellström, E., Thunell, A., V.Papadopoulos, A., & Notle, T. (2019). Towards Automated Installation of Reinforcement Using Industrial Robots. *ETFA*, 24, pp. 1595-1598.
- Roith, B., Troll, A., & Rieg, F. (2007). Integrated finite element analysis (FEA) in three-dimensional computer aided design programs (CAD) – overview and comparison. *International conference on engineering design*. Paris: Department of Engineering Design and CAD, University of Bayreuth.
- Sandberg, J., & Hjort, B. (1996). *Armeringsteknik*. Stockholm: Byggtreprenörerna.
- Śloderbach, Z., & Pajak, J. (2015). determination of ranges of components of heat affected zone including changes of structure. *Archives of Metallurgy and Materials*, 60, pp. 2607-2612.
- The Aberdeen Group. (1984). Types of rebar ties. *Concrete Construction*.

Appendix A: LUSAS results full connection stiffness

Attribute: 1 Title: LGeo1 (CSS D=10mm)

Sub Type = Line Geometric

Assigned in: Analysis 1

Property	Symbol	Value
Cross sectional area	A	78.5398E-6
Second moment of area about y axis	Iyy	0.492874E-9
Second moment of area about z axis	Izz	0.492874E-9
Product moment of area	Iyz	0.0
Torsional constant	J	0.977148E-9
Eccentricity in local z direction	ez	0.0
Eccentricity in local y direction	ey	0.0
Wagner constant 1st moment of square radius about y (Iyr)	Iyr	-3.59795E-27
Wagner constant 1st moment of square radius about z (Izr)	Izr	-3.78785E-27
Wagner constant 4th moment of area about origin (Irr)	Irr	16.2511E-15
Wagner constant 2nd moment of warping about origin (Iwr)	Iwr	-0.300277E-30
Effective shear area in local z direction	Asz	67.1693E-6
Effective shear area in local y direction	Asy	67.1693E-6
Plastic area	Ap	78.5398E-6
Plastic modulus for bending about y	Zpy	0.16611E-6
Plastic modulus for bending about z	Zpz	0.16611E-6
Plastic neutral axis, distance from centroid along y axis	yp	0.0
Plastic neutral axis, distance from centroid along z axis	zp	0.0
Plastic torsional section modulus	Zpt	0.16611E-6
Warping torsional constant about shear centre	Cw	0.1944E-21
Shear centre about y axis	yo	0.0
Shear centre about z axis	zo	0.0
Monosymmetry constant about y	betay	0.0
Monosymmetry constant about z	betaz	0.0
Element type	element type	"3D Thick Beam"
Reinforcement	reinforcement	None

Figure A 1 Geometrical data for 10 mm rebars

Attribute: 2 Title: LGeo2 (CSS D=8mm)

Sub Type = Line Geometric

Assigned in: Analysis 1

Property	Symbol	Value
Cross sectional area	A	50.2655E-6
Second moment of area about y axis	Iyy	0.201062E-9
Second moment of area about z axis	Izz	0.201062E-9
Product moment of area	Iyz	0.0
Torsional constant	J	0.400289E-9
Eccentricity in local z direction	ez	0.0
Eccentricity in local y direction	ey	0.0
Wagner constant 1st moment of square radius about y (Iyr)	Iyr	-0.503811E-27
Wagner constant 1st moment of square radius about z (Izr)	Izr	-0.778535E-27
Wagner constant 4th moment of area about origin (Irr)	Irr	4.26038E-15
Wagner constant 2nd moment of warping about origin (Iwr)	Iwr	15.7117E-33
Effective shear area in local z direction	Asz	42.9885E-6
Effective shear area in local y direction	Asy	42.9885E-6
Plastic area	Ap	50.2655E-6
Plastic modulus for bending about y	Zpy	85.0448E-9
Plastic modulus for bending about z	Zpz	85.0448E-9
Plastic neutral axis, distance from centroid along y axis	yp	0.0
Plastic neutral axis, distance from centroid along z axis	zp	0.0
Plastic torsional section modulus	Zpt	0.133587E-6
Warping torsional constant about shear centre	Cw	50.9608E-24
Shear centre about y axis	yo	0.0
Shear centre about z axis	zo	0.0
Monosymmetry constant about y	betay	0.0
Monosymmetry constant about z	betaz	0.0
Element type	element type	"3D Thick Beam"
Reinforcement	reinforcement	None

Figure A 2 Geometrical data for 8 mm rebars

Attribute: 3 Title: LGeo3 (CSS D=12mm)

Sub Type = Line Geometric

Assigned in: Analysis 1

Property	Symbol	Value
Cross sectional area	A	0.113097E-3
Second moment of area about y axis	Iyy	1.01788E-9
Second moment of area about z axis	Izz	1.01788E-9
Product moment of area	Iyz	0.0
Torsional constant	J	2.02646E-9
Eccentricity in local z direction	ez	0.0
Eccentricity in local y direction	ey	0.0
Wagner constant 1st moment of square radius about y (Iyr)	Iyr	-3.3752E-27
Wagner constant 1st moment of square radius about z (Izr)	Izr	-2.50119E-27
Wagner constant 4th moment of area about origin (Irr)	Irr	48.5284E-15
Wagner constant 2nd moment of warping about origin (Iwr)	Iwr	0.26856E-30
Effective shear area in local z direction	Asz	96.724E-6
Effective shear area in local y direction	Asy	96.724E-6
Plastic area	Ap	0.113097E-3
Plastic modulus for bending about y	Zpy	0.287026E-6
Plastic modulus for bending about z	Zpz	0.287027E-6
Plastic neutral axis, distance from centroid along y axis	yp	0.0
Plastic neutral axis, distance from centroid along z axis	zp	0.0
Plastic torsional section modulus	Zpt	0.450855E-6
Warping torsional constant about shear centre	Cw	0.580475E-21
Shear centre about y axis	yo	0.0
Shear centre about z axis	zo	0.0
Monosymmetry constant about y	betay	0.0
Monosymmetry constant about z	betaz	0.0
Element type	elementType	"3D Thick Beam"
Reinforcement	reinforcement	None

Figure A 3 Geometrical data for 12 mm rebars

Attribute: 1 Title: rebar (500B | Steel - Reinforcing bar | EN1992-2:2005)

Sub Type = Isotropic Material

Assigned in: Analysis 1

Property	Symbol	Value
Young's modulus	E	200.0E9
Poisson's ratio	nu	0.3
Density	rho	7.85E3
Coefficient of thermal expansion	alpha	12.0E-6
Characteristic yield strength of reinforcement	fy	500.0E6
Characteristic ultimate strain limit	epsu	0.05

Figure A 4 Material data for rebars

Analysis: Analysis 1
Loadcase: 1 Loadcase 1
Results file: armeringskoeg_knutpunkt_analysis2-Analysis 1.mys
Entity: Displacement
Component: DZ (Units: m)



Figure A 5 Contours of maximum vertical deformation in z-direction

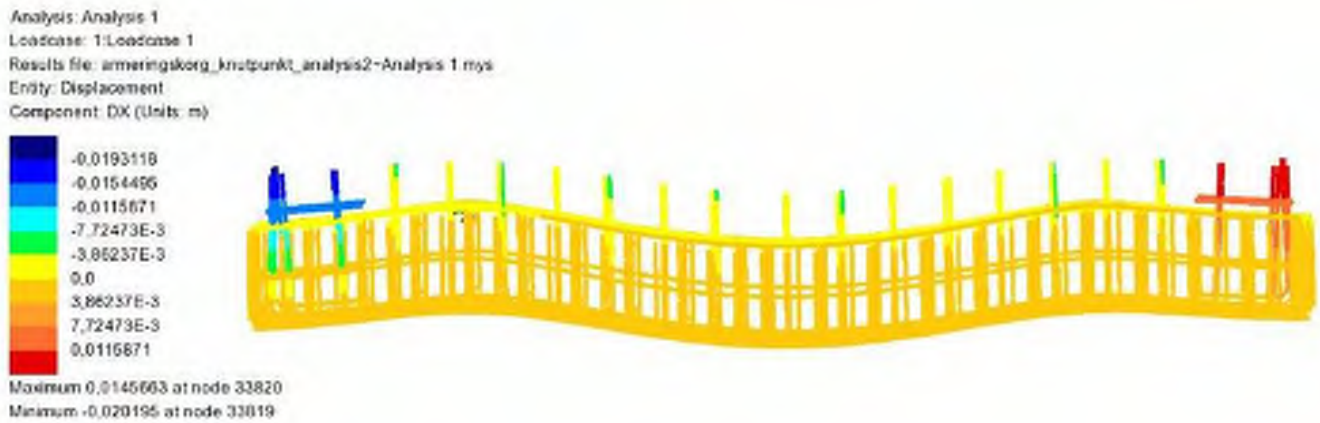


Figure A 6 Contours of maximum horizontal deformation in x-direction

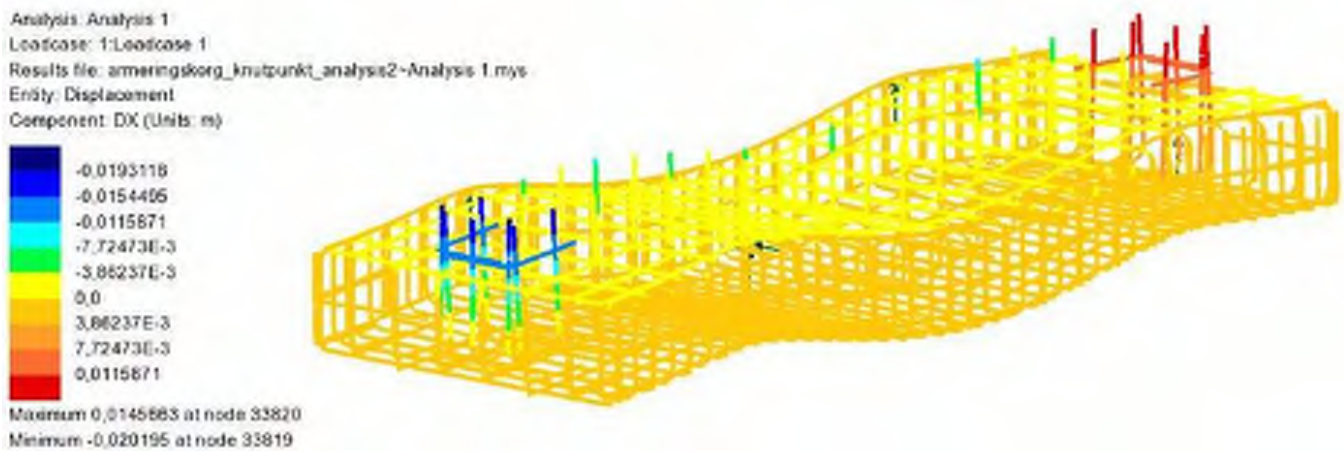


Figure A 7 Contours of maximum horizontal deformation in x-direction

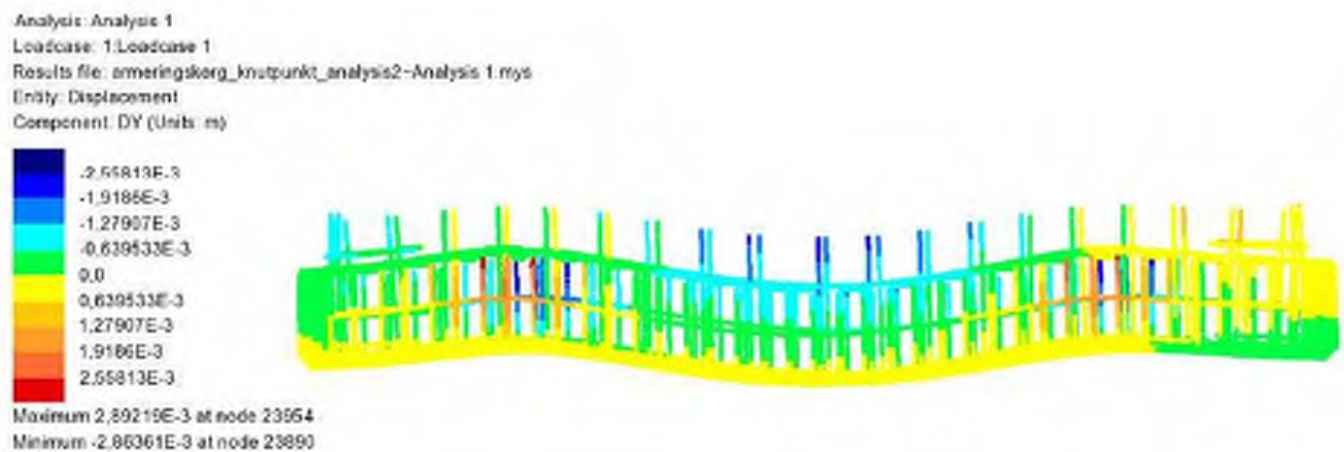


Figure A 8 Contours of maximum horizontal deformation in y-direction

Analysis: Analysis 1
 Loadcase: 1: Loadcase 1
 Results file: armstrong_knulpunkt_analysis2~Analysis 1.mys
 Entity: Displacement
 Component: DY (Units: m)



Maximum 2.89219E-3 at node 23954
 Minimum -2.88391E-3 at node 23890

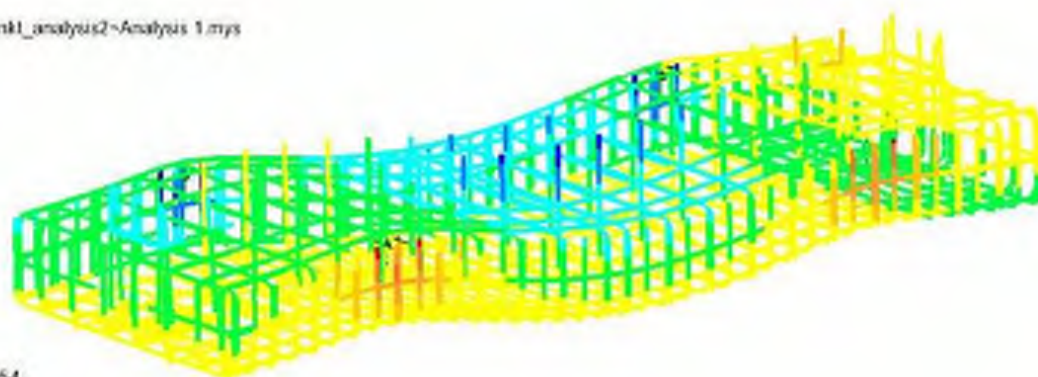


Figure A 9 Contours of maximum horizontal deformation in y-direction

Analysis: Analysis 1
 Loadcase: 1: Loadcase 1
 Results file: armstrong_knulpunkt_analysis2~Analysis 1.mys
 Entity: Force/Moment - 3D Joint (JS14, JL46)
 Component: Fy (Units: N)



Maximum 65.1742 at Gauss point 1 of element 23572
 Minimum -65.8532 at Gauss point 1 of element 23607

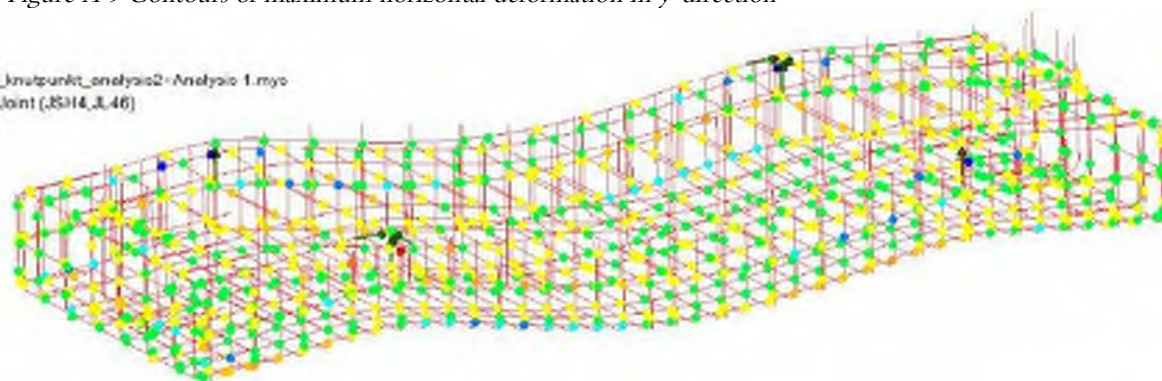
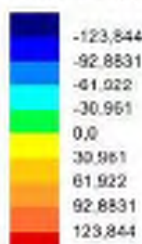


Figure A 10 Maximum force Fy for joint element

Analysis: Analysis 1
 Loadcase: 1: Loadcase 1
 Results file: armstrong_knulpunkt_analysis2~Analysis 1.mys
 Entity: Force/Moment - 3D Joint (JS14, JL46)
 Component: Fz (Units: N)



Maximum 138.422 at Gauss point 1 of element 14254
 Minimum -140.226 at Gauss point 1 of element 14257

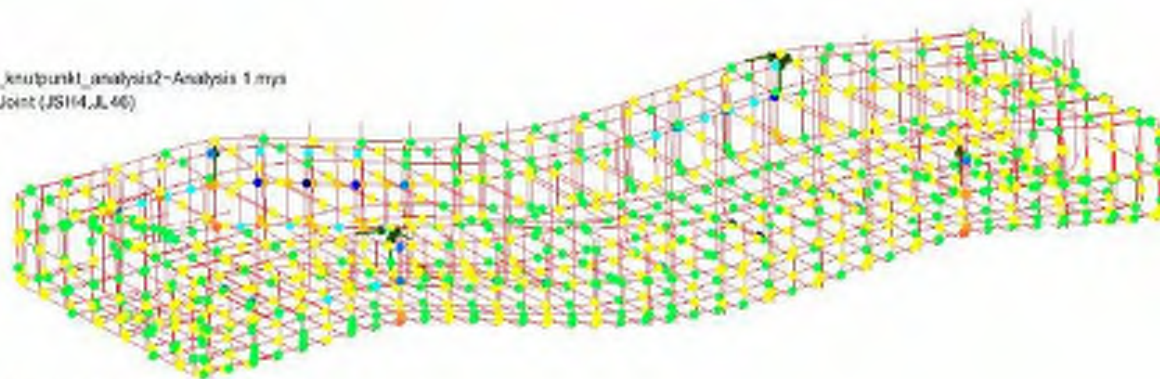


Figure A 11 Maximum force Fz for joint element

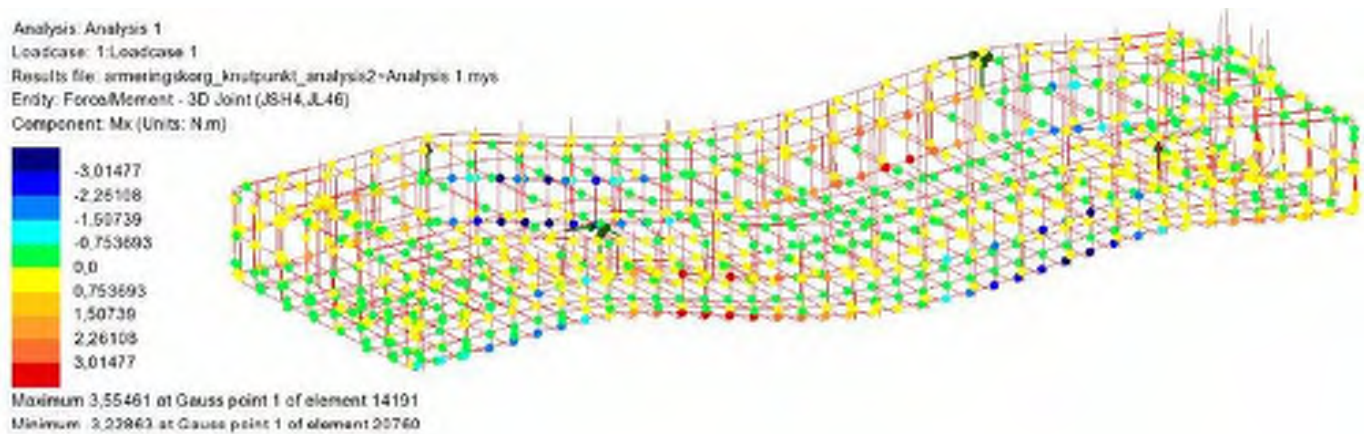


Figure A 12 Maximum moment M_x for joint element

Loadcase 1

Component	THY[rad]	THZ[rad]	RSLT[m]
Maximum	0,0760456	6,03341E-3	0,0750797
Node	12088	18481	12183
Minimum	-0,0779679	-5,92323E-3	0,0
Node	18749	18521	24187

Figure A 13 Summary table of maximum torsional displacement of the rebar cage

Loadcase 1

Node	FX[N]	FY[N]	FZ[N]	MX[N.m]
24187	-0,314133	-0,492374	539,733	N/A
24199	N/A	N/A	465,129	N/A
28667	N/A	N/A	541,811	N/A
28679	0,314133	0,492373	465,381	N/A
Total	56,7246E-9	-97,9641E-9	2,01205E3	N/A

Figure A 14 Reaction forces in the supports (lifting points)

Appendix B: LUSAS results sensitivity analysis

Table B 1 Maximum deformations for each connection stiffness

Deformations (mm)			
Connection stiffness	dz	dz	dy
100%	75,0	20,2	2,9
90%	78,4	20,8	2,9
80%	82,0	21,5	3,0
70%	86,2	22,2	3,0
60%	90,8	22,9	3,1
50%	96,1	23,8	3,2

Table B 2 Maximum stress for each connection stiffness

Stress $\sigma_{sx}(Fx, My, Mz)$ (MPa)	
Connection stiffness	σ_{sx}
100%	356
90%	363
80%	370
70%	380
60%	390
50%	402

Table B 3 Maximum force and moment acting on K_{A1} in connection type A for each connection stiffness

Force and moment in joint A (N, Nm)				
Connection stiffness	$F_{x,Ed}$	$F_{y,Ed}$	$F_{z,Ed}$	$M_{x,Ed}$
100%	127,6	66,0	116,0	3,6
90%	129,4	65,6	114,0	3,4
80%	131,4	65,1	111,6	3,1
70%	133,7	64,4	108,9	2,9
60%	136,4	63,4	105,6	2,6
50%	139,7	62,0	101,5	2,3

Table B 4 Maximum force and moment acting on $K_{B1,2}$ in connection type B for each connection stiffness

Force and moment in joint $K_{B1,2}$ (N, Nm)				
Connection stiffness	$F_{x,Ed}$	$F_{y,Ed}$	$F_{z,Ed}$	$M_{x,Ed}$
100%	144,7	12,3	132,1	1,8
90%	137,0	12,5	125,0	1,7
80%	128,5	12,6	117,2	1,6
70%	119,0	12,6	108,6	1,5
60%	108,5	12,6	99,1	1,3
50%	96,7	12,6	88,5	1,2

Table B 5 Maximum force and moment acting on K_{B3} in connection type B for each connection stiffness

Force and moment in joint K_{B3} (N, Nm)				
Connection stiffness	$F_{x,Ed}$	$F_{y,Ed}$	$F_{z,Ed}$	$M_{x,Ed}$
100%	0,0	12,9	140,2	0,0
90%	0,0	13,0	132,5	0,0
80%	0,0	13,2	123,9	0,0
70%	0,0	13,3	114,4	0,0
60%	0,0	13,4	103,9	0,0
50%	0,0	13,6	92,1	0,0

Table B 6 Maximum force and moment acting on $K_{C1,2,6,7}$ in connection type c for each connection stiffness

Force and moment in joint $K_{C1,2,6,7}$ (N, Nm)				
Connection stiffness	$F_{x,Ed}$	$F_{y,Ed}$	$F_{z,Ed}$	$M_{x,Ed}$
100%	6,4	4,4	21,0	0,4
90%	6,6	4,1	19,7	0,3
80%	6,8	3,8	18,2	0,3
70%	6,8	3,4	16,7	0,3
60%	6,8	3,1	18,0	0,2
50%	6,6	2,8	13,7	0,2

Table B 7 Maximum force and moment acting on $K_{C3,8}$ in connection type C for each connection stiffness

Force and moment in joint $K_{C3,8}$ (N, Nm)				
Connection stiffness	$F_{x,Ed}$	$F_{y,Ed}$	$F_{z,Ed}$	$M_{x,Ed}$
100%	0,0	2,3	31,5	0,0
90%	0,0	2,1	30,7	0,0
80%	0,0	2,0	29,7	0,0
70%	0,0	1,9	28,6	0,0
60%	0,0	1,7	27,4	0,0
50%	0,0	1,6	25,9	0,0

Table B 8 Maximum force and moment acting on $K_{C4,5}$ in connection type C for each connection stiffness

Force and moment in joint $K_{C4,5}$ (N, Nm)				
Connection stiffness	$F_{x,Ed}$	$F_{y,Ed}$	$F_{z,Ed}$	$M_{x,Ed}$
100%	0,0	5,4	24,6	0,0
90%	0,0	4,9	24,0	0,0
80%	0,0	4,4	23,4	0,0
70%	0,0	3,9	22,7	0,0
60%	0,0	3,4	21,9	0,0
50%	0,0	2,8	20,9	0,0

Table B 9 Maximum force F_x acting in connection type A for each connection stiffness

Force in connection A			
Connection stiffness	Calculated force	Design strength	Utilization (%)
	$F_{x,Ed}$ (N)	$F_{x,Rd}$ (N)	
100%	127,6	1356,7	9,4
90%	129,4	1356,7	9,5
80%	131,4	1356,7	9,7
70%	133,7	1356,7	9,9
60%	136,4	1356,7	10,1
50%	139,7	1356,7	10,3

Table B 10 Maximum force F_y acting in connection type A for each connection stiffness

Force in connection A			
Connection stiffness	Calculated force	Design strength	Utilization (%)
	$F_{y,Ed}$ (N)	$F_{y,Rd}$ (N)	
100%	66,0	1196,6	5,5
90%	65,6	1196,6	5,5
80%	65,1	1196,6	5,4
70%	64,4	1196,6	5,4
60%	63,4	1196,6	5,3
50%	62,0	1196,6	5,2

Table B 11 Maximum force F_z acting in connection type A for each connection stiffness

Force in connection A			
Capacity capacity	Calculated force	Design strength	Utilization (%)
	$F_{z,Ed}$ (N)	$F_{z,Rd}$ (N)	
100%	116,0	1196,6	9,7
90%	114,0	1196,6	9,5
80%	111,6	1196,6	9,3
70%	108,9	1196,6	9,1
60%	105,6	1196,6	8,8
50%	101,5	1196,6	8,5

Table B 12 Maximum moment M_x acting in connection type A for each connection stiffness

Moment in connection A			
Connection stiffness	Calculated force	Design strength	Utilization (%)
	$M_{x,Ed}$ (Nm)	$M_{x,Rd}$ (Nm)	
100%	3,6	25,2	14,1
90%	3,4	25,2	13,3
80%	3,1	25,2	12,4
70%	2,9	25,2	11,5
60%	2,6	25,2	10,4
50%	2,3	25,2	9,3

Table B 13 Maximum force F_x acting in connection type B for each connection stiffness

Force in connection B			
Connection stiffness	Calculated force	Design strength	Utilization (%)
	$F_{x,Ed}$ (N)	$F_{x,Rd}$ (N)	
100%	144,7	452,2	32,0
90%	137,0	452,2	30,3
80%	128,5	452,2	28,4
70%	119,0	452,2	26,3
60%	108,5	452,2	24,0
50%	96,7	452,2	21,4

Table B 14 Maximum force F_y acting in connection type B for each connection stiffness

Force in connection B			
Connection stiffness	Calculated force	Design strength	Utilization (%)
	$F_{y,Ed}$ (N)	$F_{y,Rd}$ (N)	
100%	12,9	398,9	3,2
90%	13,0	398,9	3,3
80%	13,2	398,9	3,3
70%	13,3	398,9	3,3
60%	13,4	398,9	3,4
50%	13,6	398,9	3,4

Table B 15 Maximum force F_z acting in connection type B for each connection stiffness

Force in connection B			
Connection stiffness	Calculated force	Design strength	Utilization (%)
	$F_{z,Ed}$ (N)	$F_{z,Rd}$ (N)	
100%	140,2	398,9	35,2
90%	132,5	398,9	33,2
80%	123,9	398,9	31,1
70%	114,4	398,9	28,7
60%	103,9	398,9	26,0
50%	92,1	398,9	23,1

Table B 16 Maximum moment M_x acting in connection type B for each connection stiffness

Moment in connection B			
Connection stiffness	Calculated force	Design strength	Utilization (%)
	$M_{x,Ed}$ (Nm)	$M_{x,Rd}$ (Nm)	
100%	1,8	12,6	14,5
90%	1,7	12,6	13,6
80%	1,6	12,6	12,7
70%	1,5	12,6	11,7
60%	1,3	12,6	10,7
50%	1,2	12,6	9,4

Table B 17 Maximum force F_x acting in connection type C for each connection stiffness

Force in connection C			
Connection stiffness	Calculated force	Design strength	Utilization (%)
	$F_{x,Ed}$ (N)	$F_{x,Rd}$ (N)	
100%	6,4	226,1	2,8
90%	6,6	226,1	2,9
80%	6,8	226,1	3,0
70%	6,8	226,1	3,0
60%	6,8	226,1	3,0
50%	6,6	226,1	2,9

Table B 18 Maximum force F_y acting in connection type C for each connection stiffness

Force in connection C			
Connection stiffness	Calculated force	Design strength	Utilization (%)
	$F_{y,Ed}$ (N)	$F_{y,Rd}$ (N)	
100%	5,4	199,4	2,7
90%	4,9	199,4	2,5
80%	4,4	199,4	2,2
70%	3,9	199,4	2,0
60%	3,4	199,4	1,7
50%	2,8	199,4	1,4

Table B 19 Maximum force F_z acting in connection type C for each connection stiffness

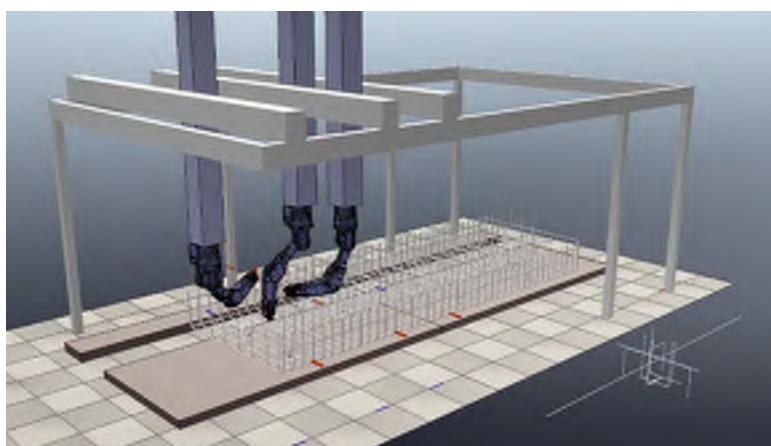
Force in connection C			
Connection stiffness	Calculated force	Design strength	Utilization (%)
	$F_{z,Ed}$ (N)	$F_{z,Rd}$ (N)	
100%	31,5	199,4	15,8
90%	30,7	199,4	15,4
80%	29,7	199,4	14,9
70%	28,6	199,4	14,3
60%	27,4	199,4	13,7
50%	25,9	199,4	13,0

Table B 20 Maximum moment M_x acting in connection type C for each connection stiffness

Moment in connection C			
Connection stiffness	Calculated force	Design strength	Utilization (%)
	$M_{x,Ed}$ (Nm)	$M_{x,Rd}$ (Nm)	
100%	0,4	6,3	5,7
90%	0,3	6,3	5,3
80%	0,3	6,3	4,8
70%	0,3	6,3	4,3
60%	0,2	6,3	3,8
50%	0,2	6,3	3,2

BYGGAUTOMATION

Banplanering och demonstrator för robottillverkade armeringskorgar



Johan Relefors, Robotdalen AB

2021-02-28

FÖRORD

Projektet har genomförts i samarbete mellan Skanska Sverige AB och Robotdalen AB. Den ursprungliga omfattningen med såväl teoretiskt arbete med banplanering som fysisk demonstration reducerades efter överenskommelse med SBUF till att enbart omfatta den teoretiska delen.

Lars Pettersson, Ulf Håkansson och Abubakar Kathry har deltagit i projektet från Skanska Sveriges sida. Från Robotdalens sida har Johan Relefors deltagit.

Johan Relefors är huvudförfattare till denna rapport. Lars Pettersson har redigerat rapporten och översatt den till svenska.

Projektteamet vill tacka SBUF, Skanska och Robotdalen för finansiellt såväl som tekniskt stöd under projektiden.

Februari 2021

Johan Relefors

SAMMANFATTNING

Denna rapport beskriver principerna för algoritmer avsedda för beräkning av de robotrörelser som krävs för att montera samma en armeringskorg beskriven med hjälp av en digital modell. Algoritmerna är avsedda för ett gantry-robot-system bestående av tre industrirobotar hängande i en ställning ("gantry-struktur") som medger att robotarna kan flyttas såväl i horisontal- som i vertikalled.

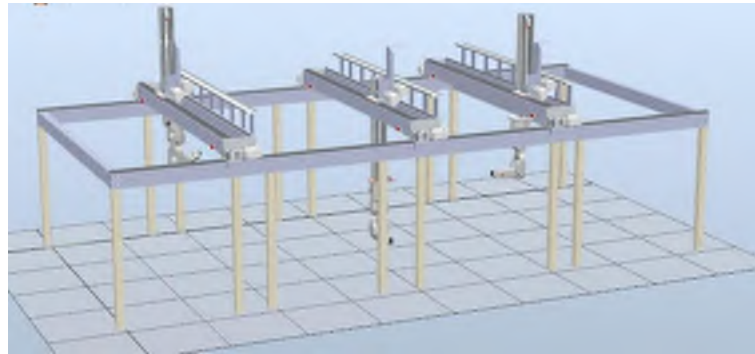
Simuleringar gjorda med programvaran CoppeliaSim visar att konceptet, under förutsättning av ideala förhållanden, fungerar som tänkt.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1. INLEDNING	4
2. BANPLANERING.....	5
<i>Allmänt</i>	<i>5</i>
<i>Att skapa den bana längs vilken armeringsjärnet ska röra sig.....</i>	<i>5</i>
<i>Att placera armeringsjärnet i sin slutposition.....</i>	<i>6</i>
<i>Att skapa najningspositioner</i>	<i>6</i>
<i>Att skapa banor för att hämta och placera</i>	<i>6</i>
<i>Att skapa robotbanor för najning</i>	<i>7</i>
3. SIMULERING OCH RESULTAT	8

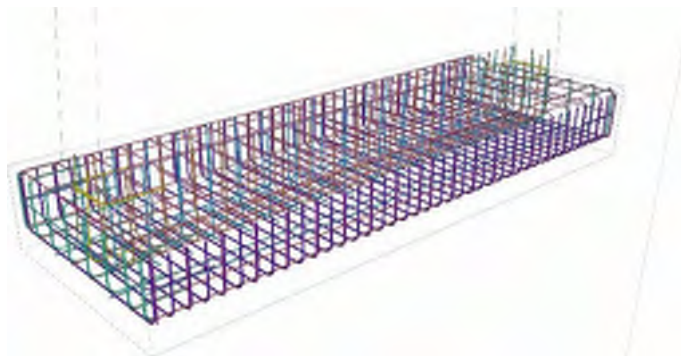
1. INLEDNING

Armering installeras i dagsläget manuellt och ofta järn för järn. Den frågeställning som har varit utgångspunkten för detta projekt är om en maskin skulle kunna utföra detta arbete. Den tänkta maskinen består av tre industrirobotar som hänger upp och ner i en ställning, utformad så att robotarna kan flytta sig i såväl horisontalplanet som i vertikalled (se figur 1). Tanken med maskinen/produktionscellen är att den ska kunna förtillverka armeringskorgar (ref. [1]).



Figur 1. Digital modell av den tänkta maskinen för förtillverkning av armeringskorgar.

Armering dimensioneras och utformas för den konstruktion som de ingår i. Detta innebär att arbetet med att installera armering inte kan liknas vid serietillverkning, förutsättningarna ändrar sig från konstruktion till konstruktion. Att programmera robotarnas rörelser för att installera armeringen för varje enskild konstruktion tar för lång tid. Istället måste armeringsjärnens banor och motsvarande robotrörelser beräknas. Indata för en sådan beräkning måste utgöras av uppgifter om hur armeringen är tänkt att se ut i den färdiga konstruktionen. Det ligger nära tillhands att använda en digital tvilling (se figur 2) av armeringen i den färdiga konstruktionen som indata.



Figur 2. Digital modell av en armeringskorg avsedd för bottenplattan i ett brostöd.

Syftet med detta projekt har varit att studera principerna för sådana beräkningar under ideala förhållanden.

2. BANPLANERING

Allmänt

Den bana som åsyftas i detta projekt är det enskilda armeringsjärnets bana. Järnet ska kunna hämtas i hämta-positionen och sedan förflyttas till slutpositionen utan att kollidera med andra armeringsjärn eller andra hinder. Robotarna som håller i järnet ska kunna förflytta sig längs samma bana och på samma sätt göra detta utan att kollidera med vare sig tidigare monterad armering eller andra hinder. Detta innebär således att hänsyn måste tas till hinder som successivt blir fler allteftersom armeringskorgen färdigställs.

Arbetet med att beräkna det enskilda armeringsjärnets bana från en så kallad hämta-position till den avsedda positionen i konstruktionen och robotarnas rörelser för att skapa denna bana samtidigt som kollisioner undviks benämns banplanering.

I detta projekt har banplaneringen genomförts i följande steg:

1. Skapa den bana längs vilken armeringsjärnet ska röra sig.
2. Skapa robotkonfigurationer för placering av armeringsjärnet i korgen.
3. Skapa robotkonfigurationer för att naja medan en eller flera robotar fortfarande håller i armeringsjärnet.
4. Skapa robotbanorna för att hämta respektive placera armeringsjärnet.
5. Skapa robotbanor för najning och flytta om nödvändigt de robotar som inte najar ur vägen.

Att skapa den bana längs vilken armeringsjärnet ska röra sig

Det enskilda armeringsjärnets bana beräknas med början i järnets position i korgen och slutar där järnet ska hämtas, hämta-positionen. Anledningen till att banan bestäms baklänges är att detta är ett enklare problem att lösa än att placera järnet i korgen. Anledningen till detta i sin tur är i första hand de många möjliga kollisionspunkter som finns i korgen.

Att skapa en bana som beskriver hur ett armeringsjärn flyttas bort från armeringskorgen görs i ett antal bestämda steg. Järnets position sparas efter varje steg. Detta leder till en bana som består av så kallade vägpunkter. Stegen för att åstadkomma detta är:

1. Tillämpa analogin med en repulsiv potential mellan det järn för vilket banan ska beräknas och dess grannar i korgen.
2. Lyft järnet rakt upp så mycket att det kan flyttas fritt ovanför korgen.
3. Flytta armeringsjärnet till korgens mitt.
4. Flytta och rotera armeringsjärnet så att det placeras ovanför hämta-positionen.
5. Sänk ner armeringsjärnet till hämta-positionen.

Att tillämpa en repulsiv potential mellan det järn som ska flyttas och de andra armeringsjärnen i korgen betyder att järnet som ska flyttas skjuts iväg från sina grannar i en riktning

där inga kollisioner inträffar. Idén med denna metodik är att finna en väg till positionen i korgen när järnet ska placeras i denna.

Potentialen har valts utgående från dels de initiala respektive önskvärda avstånden mellan det järn som ska flyttas och de andra järnen i korgen, dels det antal iterationer som krävs för att ta bort järnet.

Efter detta steg lyfter vi järnet rakt upp samtidigt som kontroll görs av tänkbara kollisioner. Järnet lyfts till en nivå som medger att järnet kan flyttas utan hinder. Järnet flyttas sedan till en position rakt ovanför den position där det ska hämtas och sänks därefter rakt ned. Under förflyttningen orienteras också järnet så att det har den tänkta orienteringen i positionen där det ska hämtas.

Att placera armeringsjärnet i sin slutposition

Att bestämma lämpliga robotkonfigurationer för placering av järnet görs genom att slumpmässigt prova olika gantry-positioner och använda inverterad kinematik för de resterande 6 frihetsgraderna. Vi kontrollerar sedan att roboten kan släppa järnet i dess tänkta position utan att stöta mot något hinder. Om en robot inte används placeras den i en position som inte kommer att påverka de rörelser som krävs för att placera järnet.

Om najningen inte ytterligare komplicerade uppgiften att placera järnet så vore alla kollisionsfria konfigurationer likvärdiga. Vi behöver dock hålla de robotar som placerar järnet stilla när vi najar, åtminstone för några av najningspunkterna. Därför måste vi anpassa placeringskonfigurationen för att ge plats för najningen. För att göra detta provar vi ett antal placeringskonfigurationer och väljer den med störst skillnad längs gantrys längsta axel.

Att skapa najningspositioner

Så som påpekades i det föregående avsnittet håller vi robotarna som håller i järnet stilla när vi najar, åtminstone för några najningspunkter. Några av najningspunkterna är eventuellt inte möjliga att nå på detta sätt.

Så länge som vi håller de robotarna som håller i järnet stilla provar vi najningspositioner på samma sätt som vi provar placeringspositioner. Vi kontrollerar också att roboten kan utföra en linjär rörelse för att närma sig najningspunkten.

I de fall då vi måste flytta någon av robotarna som håller i järnet så placeras den i en lämplig position där den inte inkräktar på najningsoperationen.

Att skapa banor för att hämta och placera

I detta steg används armeringsjärnets vägpunkter och konfigurationen för att placera järnet i sin slutposition vilket är konfigurationen i den första vägpunkten. Vi provar därefter hela systemet i nästa vägpunkt genom att prova med gantryn och att använda inverterad kinematik för de resterande 6 frihetsgraderna (inverterad kinematik används i detta steg för att kontrollera att robotarnas räckvidd är tillräcklig).

Interpolering för armeringsjärnets orientering görs med sfärisk linjär interpolation och med linjär interpolation för dess läge. Interpolering för robotarna görs med linjär interpolation för gantryn medan inverterad kinematik används för de resterande 6 frihetsgraderna för att möjliggöra att greppen av armeringsjärnen kan följas och att banorna för robotarnas leder måste vara kontinuerliga. I varje steg i interpoleringen utförs också kollisionskontroller för att säkerställa att banan är kollisionsfri.

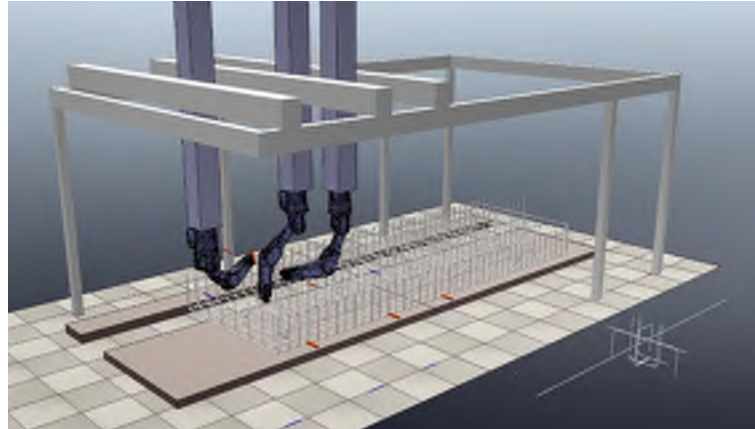
Så snart en bana mellan den första och andra vägpunkten har bestämts fortsätter processen mellan den andra och tredje vägpunkten. Den beräknade konfigurationen vid vägpunkt 2 används som utgångspunkt för robotarna. Processen fungerar inte för varje möjlig slumpmässigt valt prov vid varje vägpunkt. Därför görs flera försök för att hitta en bana. När vi gör detta används en djup-först-sökning där startkonfigurationen vid varje given vägpunkt används ett maximerat antal gånger. Vi avslutar sökningen när en (1) bana till upphämningsplatsen har identifierats.

Att skapa robotbanor för najning

Najningsbanorna beräknas genom att använda så kallad bi-directional RRT-Connect (BiRRT). Najningsroboten startar i en position där den inte är i vägen för placeringen av armeringsjärnet. Därefter beräknas banan till den första najningspunkten, den andra osv. Om någon av robotarna som används för att placera järnet måste flyttas för att kunna fortsätta beräknas banan för denna rörelse också med hjälp av BiRRT. När detta görs hålls de andra två robotarna stilla.

3. SIMULERING OCH RESULTAT

För att prova de algoritmer som beskrivs ovan har programvaran CoppeliaSim använts. I CoppeliaSim har produktionscellens gantry och robotar modellerats. De robotar som används är ABB:s IRB1200-7/0.7. Figur 3 visar produktionscellen i CoppeliaSim vid installation av armeringsjärn.



De simuleringar med installation av armeringsjärn i en armeringskorg med successivt allt fler armeringsjärn installerade visar att det valda konceptet, under förutsättning av ideala förhållanden, fungerar som tänkt.

REFERENSER

- [1] J. Relefors, M. Momeni Kelageri, L. Pettersson, E. Hellström, A. Thunell, A. V. Papadopoulos, T. Nolte, *Towards automated installation of reinforcement using industrial robots*, in: The 24th IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, 2019, pp. 1595–1598.

URL <http://www.es.mdh.se/publications/5704->

