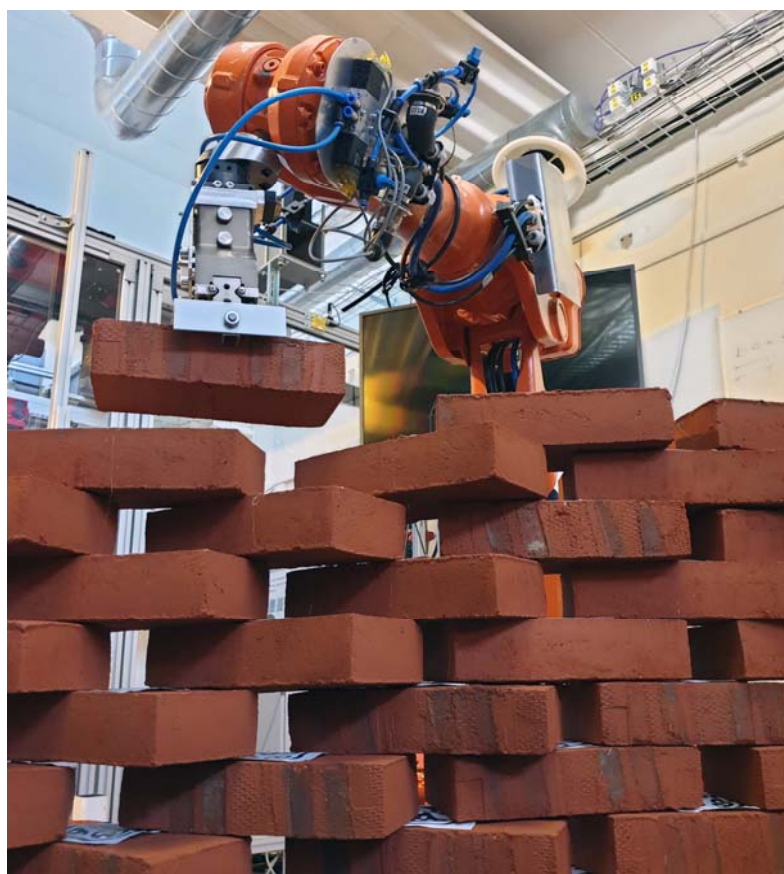


# PRODUKTIONS-AUTOMATION I BETONGBYGGANDET

*Ökad produktivitet i betongbyggandet genom  
automatisering och robotisering.*



**Petra Jenning**

**2020-01-08**

# FÖRORD

Arbetet som sammanfattas i den här rapporten har utförts under 2018-2019, och är framtaget inom nätverket för byggrobotik på LTH bestående av: LTH arkitektur, LTH datavetenskap, LTH reglerteknik och LTH Konstruktionslära. Från näringslivet har Cognibotics, CBI, FOJAB, Cementa och PEAB bidragit.

Medverkande i arbetsgruppen:

Anders Robertsson, Institutionen för Reglerteknik LTH

Helena Erikson, Winsome Consulting

Henrik Malm, FOJAB

Klas Nilsson, Cognibotics

Mathias Haage, Institutionen för Datavetenskap LTH

Mattias Lindström, PEAB

Petra Jenning, FOJAB

Robert Larsson, Cementa

Wolfram Oettel, RISE CBI

Vid murningstestet som har utförts inom projektet deltog även Ana Goidea och David Andreen från Institutionen för Arkitektur och Byggd Miljö vid LTH.

Medverkande i styrgrupp:

Andreas Furenberg, PEAB

Emile Hamon, Veidekke

Pär Åhman, Utveckling i Väst

Ronny Andersson, Cementa

Arbetet delfinansieras av SBUF och Smart Built Environment genom Uppkopplad Byggplats.

Projektgruppen vill även tacka Tegelmäster som bidrog med tegel till tekniktestet.

Vid pennan,

Petra Jenning

December 2019

# SAMMANFATTNING

Arbetet som sammanfattas i den här rapporten är framtaget inom nätverket för byggrobotik på LTH bestående av: LTH arkitektur, LTH datavetenskap, LTH reglerteknik och LTH Konstruktionslära. Från näringslivet har Cementa, Cognibotics, FOJAB och PEAB bidragit. CBI har bidragit med kompetens kring 3d-skrivning och material. Projektet är finansierat av SBUF och Multiconcrete. Det genomförda tekniktestet har dessutom finansierats inom ramen för projektet Uppkopplad Byggplats där detta är en del av testbädd AP2.3 med fokus på produktionsautomation och sensorsystem för betongbyggandet.

Syftet med projektet är att undersöka hur robotisering och automation kan stärka svenskt betongbyggande. Projektet undersöker automations- och robotiseringstekniker som kan appliceras vid byggnation av betongstommar i flerbostadshus, antingen inom prefabindustrin eller på byggplatsen. Arbetet har genomförts inom huvudsakligen tre områden; 1) behovsanalys som belyser de utmaningar och behov som byggindustrin har inom betongbyggandet, 2) teknikskanning som identifierar tekniker som är under utveckling och 3) tekniktest som undersöker utmaningarna med robotisering.

Även om prefab har ökat mycket de sista åren så finns ingen påvisad produktivitetsförbättring. Detta beror främst på de sammansatta produkternas komplexitet, oförmåga att hantera variationer i leveranser, höga fasta kostnader och bestående fragmentering i projektbaserade byggprocesser (Aitchson 2018).

En utvald expertgrupp har svarat på de frågor som ställdes första gången i ”Robotar i Byggbranschen, Möjligheter och användningsområden” (Åhman & Johansson, 1988) och en uppföljande workshop har hållits för behovsanalysen där gruppen identifierade följande kritiska områden för utveckling och förbättring:

- Uppföljning och informationsåterkoppling
- Den fysiska arbetsmiljön
- Kostnadsdrivande att producera unika delar och helheter

De moment som mest akut behöver förbättras är betonggjutning och armeringsarbeten.

Totalt har knappt 60 olika tekniker för automation och robotisering inom bygg identifierats och kategoriserats; från fjärrstyrda maskiner till fullt autonoma robotar. Teknikernas potentiella påverkan har utvärderats inom fem områden; produktivitet, arbetsmiljö, produktkvalitet, produktinnovation, miljöpåverkan.

Inom projektet har tekniktester genomförts för att undersöka och fördjupa förståelsen kring de utmaningar som uppstår vid automatisering och robotisering av manuella moment och processer. Tekniktestet fokuserar på integration av robotisering redan i designskedet och hur ett kontinuerligt och reversibelt informationsflöde kan etableras från designmodell till tillverkning.

Sammanfattningsvis så finns det stora behov inom branschen och en mängd olika tekniker som kan tillämpas för att möta dessa behov. Dock krävs det fortfarande utveckling,

framförallt för att sätta ihop olika delar (tekniker och processer) till hela fungerande system. För att få byggande robotar i reell miljö krävs:

- Utvecklad interaktion mellan människa och robot
- Standardiserat och effektivt digitalt informationsflöde från design till byggd struktur
- Maskinläsbara handlingar och dokument
- Robusta robotar som tål slitage, smuts och väta
- Kunskap och kompetens kring hantering och programmering av robotar inom bygg

För att åstadkomma mervärde vid implementering av robotar bör ett helhettänk appliceras, och tekniken integreras i så stor del av värdekedjan som möjligt. Desto tidigare i design och projektering som roboten kan introduceras desto tydligare kan dess kapacitet utnyttjas för smarta och nya lösningar. För detta krävs ett standardiserat och effektivt digitalt informationsflöde från design till byggd struktur. Digitaliseringen i tillverkningskedet medför en möjlighet till ökad generering av data kring det byggda resultatet och byggprocessen som kan användas för återkoppling och optimering av byggprocessen, men även för byggnadens förvaltningskede.

# INNEHÅLL

<b>1. BAKGRUND</b> .....	<b>5</b>
<b>2. SYFTE OCH MÅL</b> .....	<b>5</b>
<b>3. METODIK</b> .....	<b>5</b>
3.1. AVGRÄNSNINGAR .....	5
3.2. UTVÄRDERINGSKRITERIER .....	6
<b>4. BEHOVSANALYS</b> .....	<b>7</b>
4.1. METODIK .....	7
4.2. OMVÄRLDSANALYS .....	8
4.3. ENKÄTUNDERSÖKNING .....	11
4.4. WORKSHOP .....	11
4.5. RESULTAT .....	12
<b>5. TEKNIKSKANNING</b> .....	<b>13</b>
5.1. INSAMLING AV INFORMATION .....	14
5.2. ROBOTKATEGORISERING .....	16
5.3. ROBOTAR OCH ARTIFICIELL INTELLIGENS .....	22
5.4. RESULTAT .....	22
<b>6. TEKNIKTESTER</b> .....	<b>26</b>
6.1. ROBOTMURNING .....	26
<b>7. 3D-SKRIVNING / ADDITIV TILLVERKNING I BETONG</b> .....	<b>33</b>
7.1 UTVECKLINGEN .....	33
7.2 TEKNIKEN .....	33
7.3 TEKNIKUTVECKLINGEN I SVERIGE .....	35
7.4 SLUTSATSER .....	37
<b>8. FÖRUTSÄTTNINGAR &amp; UTMANINGAR</b> .....	<b>38</b>
8.1. OLIKA MILJÖER HAR OLIKA FÖRUTSÄTTNINGAR .....	38
8.2. RISKER .....	38
8.3. TRANSFORMATIVA RESPEKTIVE DISRUPTIVA TEKNOLOGIER .....	39
8.4. PROGRAMMERING OCH KUNSKAP .....	39
<b>9. IDENTIFIERADE TÄNKBARA APPLIKATIONER</b> .....	<b>39</b>
9.1. MONTAGE .....	40
9.2. GJUTNING .....	<b>FEL! BOKMÄRKET ÄR INTE DEFINIERAT.</b>
9.3. INFORMATIONÅTERFÖRING .....	42
9.4. LOGISTIK .....	43
<b>10. SLUTSATSER</b> .....	<b>44</b>
<b>11. REFERENSER</b> .....	<b>46</b>
<b>12. BILAGOR</b> .....	<b>47</b>

# 1. BAKGRUND

Digitala processer, robotik och angränsande växande teknikområden har gjort ett stort avtryck inom den allmänna tillverkningsindustrin de senaste decennierna och medfört en stark produktivitetsutveckling. Dock har man inte haft samma utveckling och tillämpning i byggbranschen, där produktivitetsutveckling motsvarar mindre än en tredjedel av vad som har åstadkommit överlag i tillverkningsindustrin de senaste två decennierna (Boumediene & Grahn, 2015). Samtidigt har byggkostnaderna ökat kraftigt under samma period, (Barbosa & et al, Reinventing Construction: A Route to Higher Productivity, 2017). Nyttjandet av den industriella digitaliseringen inom byggindustrin utgör en möjlighet till ett rejält språng gällande teknologisk utveckling och medför en möjlighet till nya produktionsmetoder och nya strukturer i byggandets försörjningskedja.

Betong är ett av våra mest använda byggnadsmaterial och det är därför ytterst relevant att stödja en fortsatt utveckling av nya processer och produktionsteknologier inom just betongbyggandet. Här kan automation och robotisering vara ett komplement som ökar produktiviteten, frigör resurser, förbättrar arbetsmiljön och även ökar kvaliteten på slutprodukten med minskad klimatpåverkan. Det handlar inte om att direkt ersätta manuell arbetskraft med robotar som utför samma arbetsuppgifter, utan att komplettera och finna ett gynnsamt samarbete mellan människa och maskin där rätt arbetskraft fokuserar på det som den är mest lämpad för.

Detta projekt är finansierat av SBUF och Cementa. Tekniktestet har dessutom finansierats inom ramen för projektet Uppkopplad Byggplats där detta är en del av testbädd AP2.3 med fokus på produktionsautomation och sensorsystem för betongbyggandet.

## 2. SYFTE OCH MÅL

Syftet med det här projektet är att undersöka hur robotisering och automation kan stärka svenskt betongbyggande. Målet har varit att undersöka vilka automations- och robotiseringstekniker som kan vara relevanta för betongsbyggandet i Sverige, genom att 1) undersöka behovet av automation inom bygg 2) belysa tillgängliga automations- och robotiseringstekniker och 3) utforska utmaningarna med att robotisera traditionellt manuella byggprocesser. Projektet har ämnat till att komma fram till en eller ett par olika tekniker som anses vara relevanta nog för att utveckla mot fullskalig implementation.

## 3. METODIK

### 3.1. Avgränsningar

Projektet ämnar att undersöka automations och robotiseringstekniker som kan appliceras vid byggnation av betongstommar i flerbostadshus, antingen inom prefabindustrin eller på byggplatsen. Då många tekniker inte har ett entydigt användningsområde, och då andra applikationsmöjligheter finns för många av de tekniker vi har identifierat så har vi valt att ta med tekniker som i nuläget inte kan anses vara relevanta för stommar i flerbostadshus, men som skulle kunna bli det på sikt.

#### 3.3.1. Definitioner

Då vi befinner oss i en tid där utvecklingen inom teknik, robotik och digitalisering går väldigt fort så har vi även valt att vara generösa med vad vi inkluderar som automatiserings-, automations-, och robotiseringsteknologier. Det som idag är en fjärrstyrd maskin kanske imorgon är en fullt autonom

robotiserad process. Men för att klargöra begreppen så skiljer vi på fjärrstyrning, automation och robotisering.

Där fjärrstyrningen innebär att en människa styr en maskin, men kan göra det med fjärrkontroll. Automation innebär att maskinen är självkörande och inte behöver en människa som aktivt styr systemet, t.ex. en självkörande bil. Wikipedia<sup>1</sup> beskriver skillnaden:

”Automation eller automatisering betyder att man låter en maskin eller teknik utföra ett arbete. Automation kommer från grekiskans ”automatos” och betyder på egen hand. Ett exempel på automation är väderkvarnar, där man låter vinden driva en kvarn, ett arbete som annars är väldigt fysiskt ansträngande.

Skillnaden på orden automation och automatisering är att automation även inkluderar någon form av styrsystem och behöver således ingen människa för att övervaka systemet, medan ett exempel på automatisering hade kunnat vara en motor som driver en svarv som fortfarande behöver en människa för att styra svarven och motorn.”

Det finns flera definitioner på robot. Ordet ”robot” i modern mening användes första gången av författaren Karel Čapek i pjäsen Rossums Universella Robotar (R.U.R), 1920. Roboten definierad som en programmerbar maskin tillkom i slutet av 50-talet i samband med att industriroboten uppfanns: 1954 installerade den första industriroboten Unimate #001 (utvecklad av George Devol och Joseph Engelberger) i en produktionslinje.

Wikipedia<sup>2</sup> definierar roboten enligt: ”En robot är en teknisk anordning, oftast en elektromekanisk maskin som styrs av elektronisk programmering, som utför fysiska uppgifter.” Idag är robot ett vidare begrepp som återfinns i allt från internet-bots till självstyrande fordon. Gemensam nämnare är dock fortfarande en enhet som är programmerbar med förmåga att interagera med vår omgivning.

## 3.2. Utvärderingskriterier

De tekniker för automation och robotisering som vi har identifierat spänner över ett brett fält. För att kunna jämföra dem och förstå deras potentiella påverkan inom bygg så utvärderar vi deras potentiella påverkan inom fem områden:

### *Produktivitet*

Vilken produktivitetsökning kan teknologin bidra med på arbetsplatsen? Produktivitetsökningen kan åstadkommas genom att samma produkt kan framställas på färre antal mantimmar, eller genom att en produkt med större eller fler värden framställs inom samma tidsram som tidigare.

### *Arbetsmiljö och säkerhet*

Bidrar tekniken till ökad personsäkerhet under byggskedet och minskad arbetsbelastning för personalen?

### *Kvalitet i slutprodukten*

Bidrar tekniken till ökad kvalitet och utökade värden i slutprodukten?

### *Innovation och nyskapande i slutprodukten*

Bidrar teknologin till nya slutprodukter som inte finns på marknaden idag, eller som inte går att framställa/bygga med dagens metoder? Teknologier som leder till hög innovationsgrad i

---

<sup>1</sup> www.wikipedia.org sökord 'Automation', 2018-11-21

<sup>2</sup> www.wikipedia.org sökord 'Robot', 2018-11-21

slutprodukten är ofta av en mer disruptiv karaktär och påverkar hela värdekedjan från design till förvaltning.

### *Ekologisk miljöpåverkan*

Bidrar tekniken till minskad miljöbelastning? Tekniken kan bidra t.ex. genom att underlätta för minskad materialåtgång eller underlätta för återbruk av ingående komponenter.

### 3.3.1. Urval av utvärderingskriterier

Vilka utvärderingskriterier som teknikerna ska utvärderas på har diskuterats livligt i projektgruppen. Värt att nämna är att ekonomi inte har kommit med som ett utvärderingskriterium, då projektgruppen anser att det är allt för svårt att bedöma kostnaden för utveckling och implementation av en teknologi, samt det potentiella kostnadsbesparing den skulle medföra om den används istället för befintlig byggprocess. Kostnadskalkylen skulle alltså behöva tittas på separat som en fördjupning för intressanta teknologier.

### 3.3.2. Bedömning

Utvärderingen av varje teknik görs utifrån kriterierna beskrivna ovan. Inom varje kriterium kan tekniken få en poäng från 0-3. Där:

- 0 = Ingen potentiell påverkan
- 1 = Liten potentiell påverkan
- 2 = Viss potentiell påverkan
- 3 = Stor potentiell påverkan

Bedömningen görs baserat på arbetsgruppens samlade kunskap och erfarenhet utifrån den uppskattade potentiella förmågan som tekniken har att förändra inom kriteriet, och alltså inte på uppmätta resultat.

## 4. BEHOVSANALYS

För att förstå behoven som finns ute i byggproduktionen så har en behovsanalys genomförts.

### 4.1. Metodik

Behovsanalysen har genomförts i tre olika steg, en omvärldsanalys i form av en litteraturstudie, enkätundersökning och en fördjupande workshop.

Enkätundersökningen och workshopen har genomförts av en expertgrupp bestående av:

<i>Mats Alhm</i>	Produktionscoach, Peab
<i>Ronny Andersson</i>	Grundare Achoice, FoI-chef Cementa, Ordförande Smart Built Environment
<i>David Andréen</i>	Arkitekt SAR/MSA, Universitetslektor Institutionen Arkitektur och Byggt Miljö, LTH
<i>Emil Augustsson</i>	Ansvarig VDC, Veidekke
<i>Mathias Haage</i>	Universitetslektor, Institutionen för Datavetenskap, LTH
<i>Petra Jennings</i>	Arkitekt SAR/MSA, Partner på FOJAB, Ansvarig FOJABcode
<i>Klas Nilsson</i>	VD, Cognibotics samt Docent, Institutionen för Datavetenskap, LTH
<i>Lars Nilsson</i>	Arkitekt SAR/MSA, BAS-P och projektarkitekt, FOJAB
<i>Ola Flink Ohlsson</i>	Bitr. regionchef Bygg Syd samt Produktionscoachchef, Peab
<i>Jim Persson</i>	VDC-ingenjör, Veidekke Sverige
<i>Roger Persson</i>	NCC
<i>Anders Robertsson</i>	Professor, Institutionen för Reglerteknik, LTH
<i>Anders Rosander</i>	Arbetsledare, Veidekke

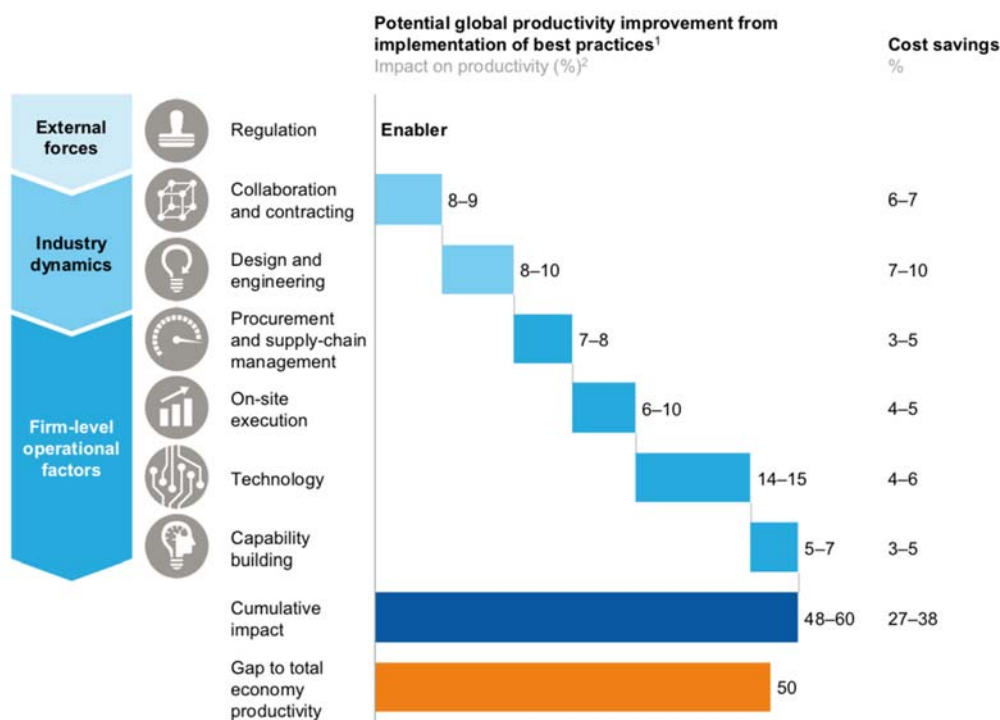


## 4.2. Omvärldsanalys

### 4.3.1. Produktivitet

Det är svårt att bedöma hur stor produktivitetsutvecklingen i branschen har varit över tid eftersom den officiella statistiken rymmer betydande mätproblem när det kommer till hur kvalitetsjusteringen av nya byggprojekt görs. I forskningsrapporten *The construction productivity debate and the measurement of service qualities* (Anil Sezer & Bröchner, 2013) nämns att byggbranschen till stora delar kan jämföras med serviceindustrin där kundens påverkan är så stor att generella produktivitmätningar inte är möjliga. Inte heller prefabricering av byggdelar har kunnat påvisa någon produktivetsförbättring.

Studien *Reinvesting Construction: A route to higher productivity* av McKinsey Global Institute (Barbosa, o.a., 2017) visar att möjligheten för att öka produktiviteten genom implementering av bästa befintliga teknik och arbetssätt med totalt upp till 48-60% med kostnadsbesparingspotential på 27-38%. Då byggindustrin omsätter över 500 mdkr per år de senaste åren så skulle det enligt studien finnas en besparingsmöjlighet på 135-190 miljarder per år enbart i Sverige. Hur mycket produktionsautomation i sig skulle kunna bidra med produktivetsmässigt beror på dess effektivitet och hur mycket den kan kopplas ihop med andra digitala verktyg. (Figur 1)

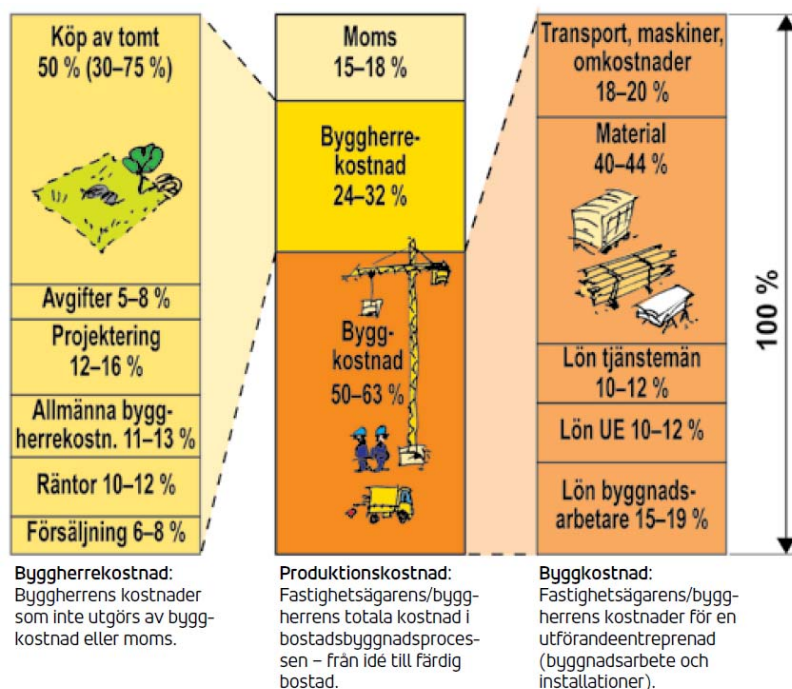


Figur 1: Potentiell produktivetsförbättring samt kostnadsbesparing vid användandet av bästa befintliga arbetssätt/teknik (McKinsey Global Institute analysis 2017)

Enligt rapporten *Bostadsbyggande – begrepp och kostnadsfördelning* (Sveriges Byggindustrier, 2017) så ser kostnadsfördelningen av att bygga i Sverige ut enligt **Fel! Hittar inte referensälla..**

Även om prefab har ökat mycket de sista åren så finns ingen påvisad produktivetsförbättring. Detta beror främst på de sammansatta produkternas komplexitet, oförmåga att hantera variationer i leveranser, höga fasta kostnader och bestående fragmentering i projektbaserade byggprocesser (Aitchson, 2018). Affärsmodellerna för, och relationerna mellan, dagens företag och organisationer är

också faktiska hinder för utvecklingen. Kundens krav på flexibla konstruktioner tvingar fram lösningar som dagens prefabricerande sammansättningsfabriker inte kan hantera.



Figur 2: Kostnadsfördelning i bostadsbyggande enligt rapporten *Bostadsbyggande – Begrep och kostnadsfördelning* utgiven av Sveriges Byggindustrier, 2017.

Enligt regeringsförklaringen den 21 januari 2019 måste bostadsbyggandet göras snabbare, billigare och mer hållbart.

#### 4.3.2. Arbetsmiljö och säkerhet

Den fysiska arbetsmiljön på byggsplatsen är hård, med hög exponering mot väder och vind.

Arbetskraften slits ut tidigt, få byggnadsarbetare ökar arbeta längre än 60 år. Glappet kommer dessutom att vidgas i framtiden när pensioneringsåldern höjs till 69 år och fortlöpande justeras uppåt.

Byggbranschen är den mest skadedrabbade yrkessektorn, enligt AFA försäkringsstatistik (AFA Försäkringar, 2019). Den vanligaste orsaken till arbetsolyckor i byggbranschen är att man faller eller ramlar. Näst vanligast är olyckor med maskiner och verktyg, därefter skärskador av olika slag. Målare löper störst risk att falla eller ramla, snickare att skada sig på maskiner och verktyg. Isolering- och VVS-montörer löper störst risk att skära sig. Det är när de kritiska faktorerna så som ålder, stress och säkerhetskultur samverkar som riskerna för allvarliga olyckor ökar. För att komma tillrätta med detta ser AFA Försäkringar att man främst behöver göra är att prioritera säkerhetsarbetet, ha god planering, genomföra riktade utbildningsinsatser och se till att ha en genomtänkt arbetsorganisation och bemanning.

De stora svenska byggföretagen jobbar systematiskt med arbetsmiljö och har kommit långt jämfört med många andra länder. Men den osunda konkurrensen utan svenska kollektivavtal som finns inom branschen medför att byggarbetare är en grupp som ofta har sämre arbetsvillkor och otrygga anställningsförhållanden, och därmed oftare råkar ut för allvarliga olyckor samt utför hälsovådliga arbeten utan erforderligt skydd även här i Sverige.

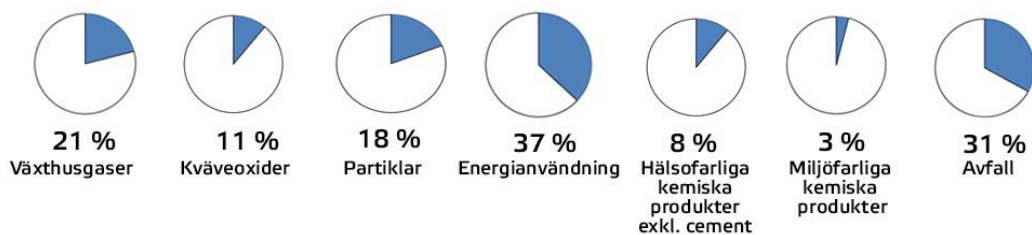
### 4.3.3. Kvalitet i slutprodukten

Rapporten *Kartläggning av fel, brister och skador inom byggsektorn* (Boverket, 2018) pekar på att det är i första hand vatten och fuktskador, med bland annat otäta klimatskal och läckande rör som dominerar problembilden. Man ser inte någon större förändring generellt under de senaste 10 åren även om det finns enskilda företag som tagit tag i problemet genom systematiska åtgärder och lyckas bättre än sina konkurrenter. Framförallt är det tidsbrist och bristande kompetens eller resurser som leder till att fel, brister och skador uppstår. I intervjuer lyfts att egenkontrollen enligt PBL oftast är verkningslösa och att det är beställaren som har störst möjlighet att påverka utfallet av kvaliteten.

De sammanlagda kostnaderna för interna och externa åtgärder av brister och fel samt kostnader knutna till ineffektiv resursanvändning bedöms uppgå till 59–73 miljarder kronor per år, räknat på 2016 års produktionsvolym. Om hänsyn dessutom tas till indirekta földeffekter bedöms de totala fastighetsekonomiska kostnaderna kunna uppgå till så mycket som 83-111 miljarder kronor per år.

### 4.3.4. Ekologisk miljöpåverkan

Enligt Boverkets sammanställning *Miljöindikatorer 2018* så visar beräkningen av bygg- och fastighetssektorns miljöpåverkan 2018 en trend med ökade utsläpp och användning för flertalet av de utvalda indikatorerna: växthusgaser, kväveoxider, partiklar och bränsleanvändning, jämfört med året innan. Även det producerade avfallet från byggskedet ökar.



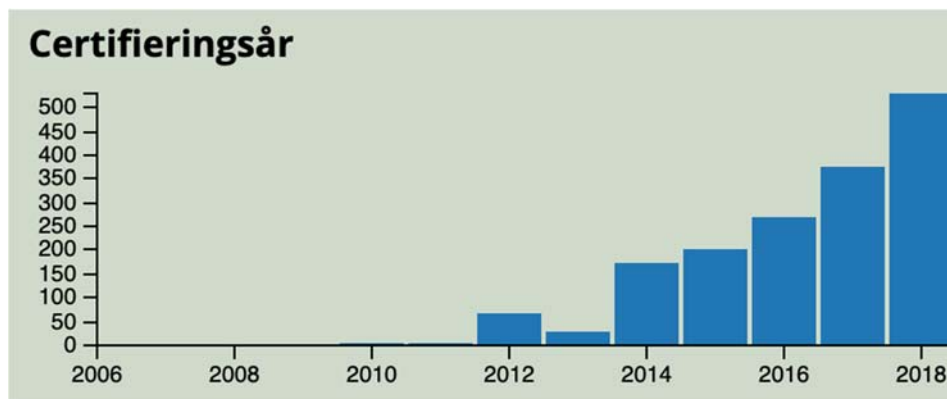
Figur 3: Boverkets miljöindikatorer 2018

Samma rapport säger att det finns behov av en ökad medvetenhet om vilken betydelse olika val i byggskedet har för miljön.

Byggverksamheten står för ca 8-9% av Sveriges koldioxidutsläpp och lika mycket används för uppvärmning av fastigheten under byggnadens livslängd (SCB 2016) Energi- och miljöcertifiering används för att bedöma och informera om en byggnads energi- och miljöprestanda och syftar till att göra det enklare för beställare och hyresgäster att välja ett hållbart alternativ. Antal miljöcertifieringar stiger stadigt (Figur 4).

I rapporten *Cirkulär ekonomi i byggbranschen - Sammanfattande översikt av forskningsläget och goda exempel* (Ejlertsson, Loh Lindholm, Green, & Ahlm, 2018) nämns bland annat exempel på återanvändning, resurseffektivare material, reducerat byggavfall, slutna kretslopp, men även helt nya affärsmodeller. Cirkulära affärsmodeller innebär ofta att en tjänst säljs istället för en vara. Nya

affärsmodeller bedöms vara en avgörande nyckel för att generera bestående förändringar inom byggbranschen (Guglielmo & Magdani, 2016).



Figur 4: Antal miljöcertifieringar sammanställning från SGBC (Swedish Green Building Council)

Betongbyggandet står idag för en betydande del av klimatpåverkan från byggindustrin, dels för att det är det vanligast förekommande materialet, och dels för att materialet traditionellt framställs i en energiintensiv process. Idag arbetas det aktivt med att framställa och tillgängliggöra klimatförbättrad betong med målsättningen att 2030 ska det finnas tillgänglig klimatneutral betong på den svenska marknaden, och 2045 ska all betong i Sverige vara klimatneutral. För att lyckas optimering ske i tre steg; 1) Val av en resurseffektiv konstruktionslösning, 2) använd "rätt betong på rätt plats" och 3) klimatförbättra de valda betongsorterna. (Svensk Betong, 2019)

### 4.3. Enkätundersökning

Den genomförda enkätundersökningen utgår från de frågor som ställdes i "Robotar i Byggbranschen, Möjligheter och användningsområden" (Åhman & Johansson, 1988). Frågorna handlar om "Arbetsuppgifter som produktionspersonal på något sätt vill förändra och förbättra" och ställdes till expertgruppen. Se svar i bilaga 1.

Värt att notera från svaren i undersökningen är att på frågan "Om situationen går att förbättra för ovan av dig nämnda arbetsuppgifter eller metodval – i vilken ordning skulle du önska att förbättringar söktes?" så lyfts i första hand betonggjutning, följt av takarbeten och armeringsarbeten. Även på frågan kring vilka moment som anses *tunga* så kommer armeringsarbeten högt upp.

Gruppen konstaterade även att man utifrån enkäten valt att samtliga moment var riskfyllda vilket skilde sig från enkätsvaren 1988 nog framförallt berodde på att man var mycket mer medveten och prioriterade säkerhet högre idag.

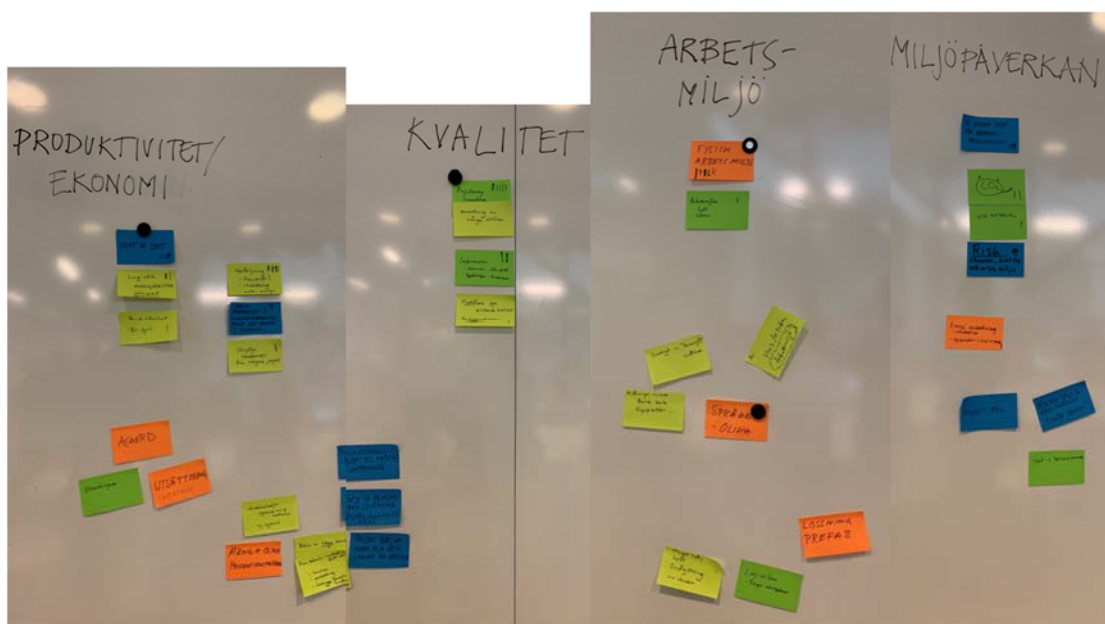
### 4.4. Workshop

Syftet med den efterföljande workshopen var att fördjupa förståelsen av enkätsvaren samt hämta in fördjupad kunskap kring behoven inom produktion (både prefab och byggplats), och diskutera hur dessa kan mötas genom befintliga och framtida automationsteknologier.

Tillsammans med enkätsvaren presenterades litteraturstudie ovan, gällande nuläget för Produktivitet/ekonomi, Kvalitet, Arbetsmiljö och Miljöpåverkan.

Gruppen konstaterade även att man utifrån enkäten valt att samtliga moment var riskfyllda vilket skilde sig från enkätsvaren 1988 nog framförallt berodde på att man var mycket mer medveten och prioriterade säkerhet högre idag.

Alla deltagare fick sedan välja ut de tre problem på tavlan som de tyckte var viktigast (Figur 5).



Figur 5: Kollage av arbetet under workshop

De områden som lyftes under workshopen var följande, med antal röster markerade för hur viktig frågan ansågs vara:

<p><b>Produktivitet/ Ekonomi</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Uppföljning (9 röster) <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Framdrift</li> <li>○ Utvärdering</li> <li>○ Mäta &amp; analys</li> <li>○ Daglig information &amp; kunskapsåterföring kring best practise &amp; kostnader</li> <li>○ Utnyttja erfarenheter kring tidigare projekt</li> </ul> </li> <li>• Unikt är dyrt (5 röster)</li> <li>• Logistik (2 röster) <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Dötid/ställtid</li> <li>○ Oplanerad byggplatsstyrning</li> </ul> </li> <li>• Produktivitet är för dyrt (1 röst)</li> </ul>	<p><b>Kvalitet i slutprodukten</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Projektering, samordning (5 röster) <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Samordning av många aktörer</li> </ul> </li> <li>• Information (2 röster) <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Information på olika språk</li> <li>○ Uppdateringar</li> <li>○ Revideringar</li> </ul> </li> <li>• Modifieringar pga. bristande kvalitet (1 röst) <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Ombyggnadsbehov</li> </ul> </li> </ul>
<p><b>Arbetsmiljö</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fysisk Arbetsmiljö (8 röster) <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Lyft</li> <li>○ Stress</li> </ul> </li> </ul>	<p><b>Ekologisk miljöpåverkan</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vi arbetar ej för materialreducering (3 röster)</li> <li>• CO<sub>2</sub> (2 röster)</li> <li>• Nya material (1 röst)</li> <li>• Risk (1 röst) <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Ekonomi, kvalitet, arbetsmiljö, miljö</li> </ul> </li> </ul>

Tabell 1: Renskrivning av det som skrevs på post-it lappar under workshopen. Ingen tolkning eller omskrivning har skett.

## 4.5. Resultat

Sammanfattningsvis identifierade gruppen att följande områden är i störst behov av utveckling i relation till produktionsautomation:

- Uppföljning och informationsåterkoppling

- Den fysiska arbetsmiljön
- Kostnadsdrivande att producera unika delar och helheter

Och de moment som mest akut behöver förbättras är betonggjutning och armeringsarbeten.

#### 4.3.1. Uppföljning och informationsåterkoppling

Återkoppling är bristande inom bygg. Högre grad av informationsåterkoppling skulle underlätta för byggets framdrift, precision och kalkyl. Det finns ett tydligt behov att få fram mer data från bygget löpande under byggskedet. För att lyckas med detta är sensorsystem för realtidsuppföljning av betongegenskaper ett viktigt område att utveckla, det faller dock inte inom ramen för detta projekt. Den information som tillgängliggörs kan användas dels för analys, utvärdering och optimering av pågående bygge, dels för jämförelser mellan olika byggen.

#### 4.3.2. Den fysiska arbetsmiljön

Arbetsmiljön på byggarbetsplatsen blir allt säkrare men fortfarande återstår många riskfyllda moment. Det är även tydligt att riskmedvetenheten hos de som vistas på byggarbetsplatsen ökar, och att man idag är mer uppmärksam och arbetar förebyggande med riskhantering. Utmärkande för olyckor är att de ofta relaterar till tunga lyft, fall & klämskador. Stress och ackordsarbete är också faktorer som lyfts fram. Givetvis är det större sannolikhet att olyckan är framme när man arbetar under stressade förhållanden.

I relation till automation och robotisering så kan man tänka skademinimerande genom att låta maskiner helt ersätta människan vid farliga moment (t.ex. fullt automatiserade lyftkranar som lyfter prefab-element på plats), eller att maskiner kan hjälpa människan vid farliga moment (t.ex. automatiserat lyftdon som justerar insättningen av väggelement) eller att helt enkelt arbeta bort behovet av ett farligt moment (t.ex. 3d-printning på plats av väggelement).

#### 4.3.3. Kostnadsdrivande att producera unika delar och helheter

Att unikt är dyrt är ett resultat av att dagens byggande är inordnat och anpassat efter de byggsystem som utvecklades i anslutning till 1960-talets miljonprogram. Under modernismens era så rådde industrialiseringsideal som byggde på standardisering och massproduktion i långa repetitiva serier. Inom detta system så blir alla unika delar, eller helheter, som ska produceras väldigt kostnadsdrivande. Samtidigt så är de flesta byggnader i större eller mindre utsträckning unika. Det är ytterst få byggnader som är kopior av varandra. Detta kan bero på olika faktorer, men drivs generellt av att platsen har olika förutsättningar och byggnaders funktioner är varierande. Dagens produktionsmetoder har svårt att leverera de kvaliteter som kunderna vill ha till en kostnadsnivå som överensstämmer med betalningsförmågan.

## 5. TEKNIKSKANNING

Arbetspaketet teknikskanning har utförts genom inhämtande av information från konferenser, studiebesök, publikationer och intervjuer. Skanningen är inte heltäckande, utan utgå ifrån den information som projektgruppen har kunnat få tillgång till. Utveckling som sker inom företag är ofta sekretessbelagd och svår att få ta del av.

Sammanställningen av teknikskanningen är dels här i rapporten, dels i dokumenten: Teknikmatris (Bilaga X) och Teknikskanning (bilaga X).

I bilaga Teknikskanning listas de tekniker som har identifierats. För varje teknik så finns det en kort beskrivning kring hur den fungerar och vad den gör, samt dess huvudsakliga utmaningar. Tekniken har även bedömts utifrån dess potentiella förmåga att påverka, 1) produktivitet, 2)

arbetsmiljö, 3) slutproduktens kvalitet, 4) slutproduktens innovationsgrad, samt 5) ekologisk miljöpåverkan. Bedömningen görs på en fyrgradig skala från 0-3 där:

0 = ingen påverkan

1 = liten påverkan

2 = mellanstor påverkan

3 = stor påverkan

Bedömningen är subjektiv, och utgår från tillgänglig information om tekniken. Ofta har det varit svårt att få tag på nyanserad fakta om teknikens potential och prisbild.

Utöver detta har varje teknik även fått ett skattat Technology Readiness Level värde, så kallat TRL-nivå, utifrån hur utvecklad tekniken är. (Mankins, 1995)

## 5.1. Insamling av information

### 5.3.1. Forskning och Konferenser

Runt om i världen bedrivs det tvärdisciplinär forskning kring klimatanpassat och effektivt betongbyggande. I Europa kan särskilt nämnas flera forskningskluster vid ETH som är drivande, t.ex. TailorCrete (Danish Technological Institute, 2014), NCCR Digital Fabrication och Digital Building Technologies (DBT). ETH har även agerat värd för flera konferenser: Digital Concrete 2018, och RobArch 2018 som arbetsgruppen har deltagit i och delrapporterat via den digitala tidningen Cementa (Larsson & Jennings, 2018).

#### *Digital Concrete 2018*

Digital Concrete är Rilem Internationals första konferens inom ”Betong och digital tillverkning”. Konferensen ägde rum i Zurich i september 2018.

Majoriteten av forskningen och projekten som presenterades fokuserade på 3d-printning av betong i olika former. Ett fält som har stått och stampat i ett par årtionden har plötsligt utvecklats explosionsartat. Inte minst syns detta i antalet patentansökningar senaste åren. Det var tydligt under konferensen att mycket forskning just nu fokuserar på att utforska betongens sammansättning för att stödja 3d-printtekniken.

Flera nya variationer på 3d-printning presenterades, bland annat additiv tillverkningen genom robotiserad sprutbetongsapplikation från kort avstånd (Lindemann, Gerbers, Ibrahim, & Dietrich, 2018). Även vikten av att utveckla geometrin som ska printas/byggas har fått fördjupad förståelse och spridning, t.ex. the Brick Labyrinth (Piskorec, o.a., 2018) där den veckade geometrin hjälper till för att stabilisera den konstruerade väggen.

Fördjupning kring 3d-print i kapitel 7.

#### *RobArch 2018*

Anordnas vartannat år av Association for Robots in Architecture. I år hölls konferensen på ETH i Zürich. Seminarier anordnades med följande teman: *Material and Processes, Construction and Structure, Application and Practice, Design and Simulation* samt *Control and Fabrication*.

#### *Innochain Conference ”Expanding Information Modelling”*

Center for Information Technology and Architecture (CITA) i Köpenhamn var i år värdar för konferensen Innochain. Innochain är ett EU finansierat nätverksprojekt för forskning inom arkitektur. Inom programmet har 12 stycken doktorander utbildats i samarbete mellan akademiska institutioner och företag över hela Europa. Fokus för programmet har varit på materialisering, simulering och kommunikation utifrån ett digitalt perspektiv.

Konferensen presenterade delar av den forskning som genomförts under programmet under följande teman: *Advanced modelling strategies & workflows*, *Design Integration* och *Material Strategies*.

Mindre seminarium förde fördjupade diskussioner inom följande områden: *Data in design practice*, *Additive manufacturing futures*, *New workflows*, *Performance materials & systems* samt *New collaborations*.

### *ISAARC*

The International Symposium on Automation and Robotics in Construction anordnas årligen av IAARC (International Association for Automation and Robotics in Construction) på olika platser runt om i världen. De publicerar presenterade artiklar från varje konferens på sin webbplats ([www.iaarc.org](http://www.iaarc.org)) och är en stor källa till kunskap från 1984 till idag. Av särskilt intresse för det här arbetet är artiklarna om inspektionsrobotar (Peel, Morgan, Peel, Cohn, & Fuentes, 2016), kabeldrivna robotar (Bruckmann, o.a., 2016), användning av exoskelett (Wooseok, Shin, Choi, Hong, & Soo Han, 2016) (Linner, Pan, Pan, Taghavi, & Bock, 2018) och applikation av robotik och automation inom byggande av höghus (Cai, Ma, Skibniewski, Guo, & Yun, 2018).

En av eldsjälarna bakom IAARC är professor Thomas Bock, som även har gett ut ett flertal böcker på ämnet, bland annat *Construction Robots, Elementary Technologies and Single-Task Construction Robots*. (Bock & Linner, 2016)

### *Deutsches Industrieseminar Beton-3D-Druck und andere digitale Betonbauverfahren*

Tekniska Universitet Dresden organiserade i november 2019 för första gången ett industriseminarium med fokus bara på 3D-printning i betong. Ämnen för presentationerna var:

- Digitala tillverkningsprocesser och överföring till praxis
- Maskinteknik, 3D skrivare, skrivarhuvud
- Betongkrav, mixed design och materialprovning
- Armeringsintegration
- Digital planering och tillverkning, utskriftsstrategier, ekonomi

Presentationerna gjordes av professorerna Mechtcherine, Will och Otto, liksom Dr.-Ing. Nerella och skissade en bra bild hur komplext och stort ämnet betong 3D skrivning är. I kortpresentationer hade företag och andra institutioner möjlighet att presentera sina aktiviteter inom betong 3D skrivarutveckling. Bredvid kända aktörer som Putzmeister (Tyskland) eller Xtree (concrete 3D printing, Frankrike) fanns också några mindre kända mindre eller mellanstora företag.

Dagens avslut var en visning av materiallaboratoriet, där olika delprojekt presenterades vid olika stationer och deras betong 3D skrivare. På seminariet presenterades också första numret av tidskriften *CPT worldwide - Construction Printing Technology* som handlar uteslutande om additiv konstruktion och digital betong.

### 5.3.2. Studiebesök

Studiebesök har genomförts på Robotlabbet ETH och DFAB House Zürich.

#### *The Robotic Fabrication Lab (RFL) ETH Zürich*

Inom ETH har ett robotlabb med fokus på byggindustrin byggts upp under senaste åren. Inom labbet finns en stor samling av olika robotar, med fokus på robotarmar. Knutet till labbet är ett nationellt forskningscentrum med focus på digital tillverkning, NCCR Digital Fabrication – Innovative Building Processes in Architecture<sup>3</sup>. Inom labbet arbetar olika forskningsgrupper och vetenskaper (arkitektur, konstruktion, robotik, material- och datorvetenskap, reglerteknik) sida vid

---

<sup>3</sup> <http://www.snf.ch/en/researchinFocus/nccr/digital-fabrication/Pages/default.aspx> (2019-08-26)



sida för att ta fram nya lösningar för byggindustrin. Fokus för labbet är att dels utveckla robotsystem för byggplatsen, samt att utveckla unika byggsystem för digital tillverkning.<sup>4</sup>

Effektmålen för labbet är minskad klimatpåverkan genom minskad materialåtgång eller ökad funktionalitet.

Labbet är utrustat med två gantrybommar i taket varav på 4 st artikulerade robotarmar är monterade. Dessa kan användas individuellt, eller i samarbete med varandra, och har en total arbetsyta om 45x17x6 meter. Utöver detta finns ett antal fristående artikulerade robotarmar, 3d-printers etc. Labbet har arkitektur som kärnämne, men är öppet för att andra discipliner att genomföra forskning som är beroende av storskalig digital tillverkning.<sup>5</sup>

### *DFAB House, Zürich*

DFAB house är ett prototypus för att visa på olika digitala tillverkningsteknologier; *Mesh Mould* med *Insitu Fabricator*, *Smart Slab*, *Smart Dynamic Casting* och robotbyggd trästomme.

Prototypuset uppförs inom EMPA House som är en plattform för prototypbyggande med nya teknologier och processer.

Alla teknologierna som demonstrerades inom DFAB house har utvecklats inom NCCR Digital Fabrication, ett statligt finansierat strategiskt forskningsprogram i Schweiz. Utvecklingen av samtliga tekniker/processer visar på vikten av samverkan mellan professioner och aktörer, samt att simultant utveckla kompetens över hela design- till tillverkningskedjan för att säkerställa mesta möjliga mervärde i slutprodukten.

### *BOD1, Köpenhamn*

Under byggnationen av BOD 1 av 3d-printhuset i Köpenhamn så besökte projektgruppen bygget. Bod 1 är den första 3d-printade byggnaden i Skandinavien och uppfördes under 2017. Byggnaden är tänkt att fungera som ett litet kontorshotell med några få arbetsplatser, en wc och ett pentry. Väggarna är 3d-printade i betong med en extruderande teknik. Printheadet är monterat på ett gantry. För att separera additiv tillverkning i betong från resten av verksamheten startade 3d-printhuset dotterbolaget Cobod<sup>6</sup>, som nu marknadsför och säljer 3d skrivare för bygg kommersiellt.

## 5.2. Robotkategorisering

Detta stycke beskriver olika robottekniker som nu testas/ används för automation relaterad till byggindustri. De kan grovt klassificeras in i tre områden beroende på sitt ursprung:

- Automatiserade maskiner
- Industrirobotar från tillverkningsindustri
- Service-robotar

### 5.3.1. Fjärrstyrda och automatiserade maskiner och utrustning

Med automatiserade och fjärrstyrda maskiner avses oftast befintliga byggfordon och maskiner som utrustats med teknik för självstyrning eller fjärrstyrning av människa. Maskinerna har fördelen att vara utvecklade specifikt för bygg, och har redan sin plats inom värdekedjan. Exempel på värdeökning vid automatisering är att ta bort människan från smutsiga och farliga miljöer, tillåta människan att snabbt växla mellan att fjärrstyra olika fordon genom komplexa moment (där enkla

<sup>4</sup> [http://www.dfab.ch/wp-content/uploads/2014/08/170215\\_NCCR\\_Brochure\\_e.pdf](http://www.dfab.ch/wp-content/uploads/2014/08/170215_NCCR_Brochure_e.pdf) (2019-08-26)

<sup>5</sup> <http://gramazio-kohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/186.html> (2019-08-26)

<sup>6</sup> <http://www.cobod.com>

moment är automatiserade), samt att flöden på arbetsplatsen kan effektiviseras så att väntetider undviks.

Exempel på automatiserade maskiner är:

- Fjärrstyrda betongpumpar
- Vibrerings-, ytavjämnings- och glättningsrobotar som bearbetar ytan efter gjutning.
- Fjärrstyrda lyftok som hjälper till vid prefabmontage

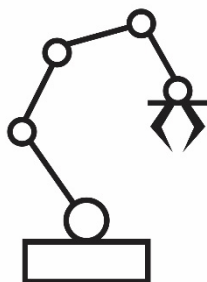
Det finns flertalet maskiner av den här typen som är utvecklade, men som man inte har kunskap eller vetskap om inom byggproduktionen, och som har svårt att komma in på marknaden. En lösning på detta vore att införa en teknikansvarig på varje bygge och/eller företag som jobbar för att sprida information om och implementera nya tekniker.

### 5.3.2. Industriella robotar från tillverkningsindustrin

Industriella robotar har sitt ursprung inom tillverkningsindustrin. De är utvecklade för långserieproduktion inom, till exempel, bilindustri. Ett antal robotiserade arbetsuppgifter har utvecklats genom åren, så som punktsvetsning och palletering, där roboten tagit över typiskt för människan smutsiga, farliga, tunga eller enahanda arbeten. Som värdeökande framhålls ofta robotens jämna produktionskvalité och snabba produktionstakt.

#### *Seriekopplade kinematiska maskiner / Artikulerade robotar*

En artikulerad robot är uppbyggd av en serie av roterande leder med mellanliggande länkar, vilket bildar en serie-kinematisk maskin (SKM) liknande en arm, se figur 2. Längst ut på armen finns en monteringspunkt där olika verktyg kan monteras. Det är möjligt att byta verktyg och därmed arbetsuppgift för roboten. Armens bas är typiskt fast monterad på ett stadigt underlag vilket gör att roboten trots stor massa kan röra sig med hög hastighet och därmed få korta cykeltider. Roboten erbjuder hög rörelsenoggrannhet ner mot submillimeternivå men har begränsad möjlig last. I jämförelse med en kran tar roboten betydligt mindre last och har mindre räckvidd, men den är snabbare och har mycket högre positioneringsnoggrannhet. För att öka räckvidden (arbetsvolymen) monteras roboten ibland på en åkbana eller en gantry<sup>7</sup>. Då är det möjligt att täcka mycket stora arbetsvolymmer. Prototypuppställningar experimenterar även med att montera robot på hjul/larvfötter för att uppnå ökad arbetsvolym.



Figur 6: Förenklat diagram av artikulerad robotarm. (Bild: FOJAB)

---

<sup>7</sup> Traversbalk med en robot eller verktyg monterat så att det kan löpa fritt längs balken (1 frihetsgrad). Traversbalken kan vara monterad på två pelare, alternativt tvärs två balkar som den kan glida längs (2 frihetsgrader). Ifall traversbalken är höj och sänkbar ger det ytterligare en frihetsgrad.

Exempel på applikationer med artikulerade robotarmar:

- Murning
- 3d printning i betong
- Behandling av ytor i våt betong

#### Data

Vikt: Från ca 25 kg till ca 4550 kg (roboten är tung i relation till sin kapacitet)

Lastkapacitet: Från ca 5 kg till ca 800 kg

Räckvidd: Från ca 0,5 m till ca 4,2 m

Data utgår från ABBs industrirobotar<sup>8</sup>.

#### *Parallellkopplade kinematiska maskiner / Parallellrobotar*

I kontrast till armroboten så består parallellroboten (eller parallellkinematisk manipulator, PKM, figur 3) av flera armliknande länkar som arbetar gemensamt för att positionera en plattform där olika verktyg kan monteras. Det vanligaste exemplet utgörs av en Stewart-plattform, även kallad hexapod, som består sex, ofta hydrauliska ben, kopplade från bas till plattform så att plattformen kan manipuleras fritt. I denna rapport bör även nämnas RoboCrane, bäst beskriven som en upp- och nedvänd Stewart-plattform med lindrift istället för ben. Konstruktionen tillåter manipulering av en plattform över mycket stora arbetsvolymerna och kan hantera tung last.

Värt att nämna är även pågående insatser vid RobotLab LTH och Cognibotics AB att skapa PKM-strukturer som kan anpassas till byggapplikationer:

- Gantry-Tau är en PKM där motorer flyttar slädar längs flera parallella åkbanor. Armar lokaliserade på slädarna utnyttjas till positionering av en plattform. Åkbanorna kan integreras med befintliga strukturer på arbetsplatsen eller sättas på en fristående supportstruktur. Då motorer är fast placerade på slädar kan armsystemet göras mycket lättviktigt. Roboten kan också göras mycket precis och styv, lämplig för bearbetning. Arbetsvolymen är fritt utbyggbar i åkbanornas längdriktning.
- Hybrid-PKM, *Figur 8*, är enkelt beskrivet en armrobot uppbyggd med parallellstag. Även här kan armsystem göras lättviktigt där vikt koncentreras till en fast bas innehållande motorpaket. Basen kan placeras på befintliga strukturer och utrustas med armpaket anpassat för uppgiften.

Lättviktiga armstrukturer är fördelaktiga ur säkerhetssynpunkt. Det är lättare att göra strukturen säker för samarbete med en människa då den innehåller mindre rörelseenergi. Den parallella kopplingen i en PKM gör även att fel tenderar att slå ut varandra snarare än att ackumulera i strukturen. De uppnår en betydligt högre styvhet än vad den artikulerade robotarmen gör. Den har hög precision och hastighet och kan generellt lyfta tungt relativt sin egen vikt.

En PKM har i princip nackdelen att den behöver ha en uträkning som täcker åtminstone en hel sida av arbetsområdet, och den har ofta svårt att ta sig runt olika typer av fysiska hinder. Roboten kan vara fast monterad, eller monterad på skenor som gör att den når ett större arbetsområde så som Gantry-Tau roboten utvecklad på LTH (Dressler, I. et al. 2007). Jämför med om man placerar en artikulerad robot på åkbana (för att nå ett större arbetsområde) så blir en PKM stabilare och mindre känslig för utböjningar pga ojämnt underlag eller förenklad montering.

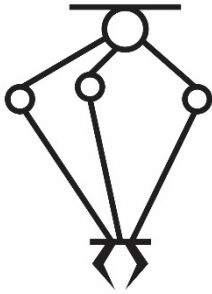
Exempel på byggrelaterade applikationer under utveckling med parallellrobotar:

- Murning, speciellt putsning
- 3d printning i betong

---

<sup>8</sup> <https://new.abb.com/products/robotics/sv> (2019-09-03)

- Olika fasadarbeten, då robottypen kan utvecklas för att klättra på byggställning.



Figur 7: Förenklat diagram av parallellrobot (Bild: FOJAB)

### Data

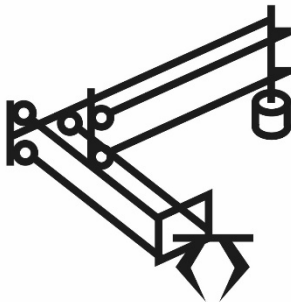
Parallellrobotarna varierar väldigt i utförande och det är därför svårt att ange även generella uppgifter om dess prestanda.

Exempel Gantry-Tau robot vid LTH:

Vikt: Armstrukturen är mycket lättviktig i förhållande till sin kapacitet

Lastkapacitet: dimensioneras efter arbetsuppgift

Räckvidd: dimensioneras efter arbetsuppgift

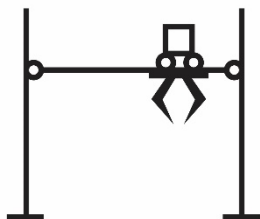


Figur 8: Förenklat diagram av hybridrobot. (Bild: FOJAB)

### Gantryrobotar

Gantryroboten är helt enkelt ett verktyg monterat på ett gantry, som styrs av en dator. Gantryt är oftast en fackverkskonstruktion som medger att verktyget kan röra sig i x-y-z-led inom fackverkets område. Gantryrobotar används främst för snabb hantering och vertikal åtkomst över medelstort område. Den här typen används ofta för 3d-printning i större skala, men även för andra CNC-operationer.

Gantryrobotar har fördelen att det är ett välkänt och beprövat koncept, och enkelt att förstå hur det fungerar. Det är även relativt lätt att skala upp till större applikationer. Dock har gantryn nackdelen att det alltid behöver vara större än sitt arbetsområde.



Figur 9: Förenklat diagram av gantryrobot (Bild: FOJAB)

Exempel på applikationer med gantryrobotar:

- 3d printning i betong
- Placering av komponenter tex utläggning av tegelsten för ingjutning i väggelement

#### Data

De gantrymonterade verktygen varierar väldigt i utförande och är svårt att generalisera data för. Generellt kan dock sägas att räckvidden är beroende av storleken på gantryt, och att själva verktygen oftast är relativt lättviktiga. Gantryt har oftast också en hög lastkapacitet.

Vikt: ca 30 – 2000 kg

Lastkapacitet: Hög

Räckvidd: typiskt ca 5x5x3m, men kan variera kraftigt

Data utgår från Robot Gantry<sup>9</sup>.

#### Linrobotar

Linrobotar består av verktyg som hänger i tre eller flera linor. Verktyger förflyttas i rummet genom att linorna förkortas respektive förlängs. Exempel på enklare parallellrobotar med linor har en räckvidd på ca 3x3x3m, är lätta, men har låg lastkapacitet och låg precision.

#### 5.3.3. Service-robotar

Robotar som utför tjänster kallas för service-robotar. Robotgräsklipparen är ett exempel på service-robot. I praktiken har begreppet utvidgats till att omfatta alla robottyper som ej är industrirobotar. Mycket förenklat kan sägas att service-robotar har möjlighet till mobilitet medan industriroboten oftast är fast monterad. Dessutom verkar service-roboten ofta i en okänd miljö medan industriroboten traditionellt verkar i en mycket välplanerad omgivning. Arbetet med att bygganpassa robotik kan delvis ses som tekniköverföring mellan service-robotik och industrirobotik, dvs att kombinera service-robotens förmåga att förflytta sig och hantera en okänd miljö med industrirobotens produktivitet. Tre exempel på service-robotar utgörs av:

- Humanoider
- Exoskelett
- Drönare

#### Humanoida robotar

Humanoida robotar är robotar som efterliknar den mänskliga kroppen. Generellt används de som servicrobotar i enklare sammanhang, men även för att ta sig fram i komplexa situationer. Senaste åren har utvecklingen gått väldigt fort framåt och robotar har börjat ta sig fram stadigt på två ben.

<sup>9</sup> <https://robotgantry.com/> (2019-10-21)

Först ut med en robot som kan gå på två ben var Honda med sin robot Asimo<sup>10</sup>. Boston Dynamics har utvecklat roboten Atlas<sup>11</sup>, som nu både kan gå, stå på händer och göra volter. Dock är dessa robotar fortfarande dyra och det är långt till implementation i bredare utsträckning.

Humanoidens potentiella fördel är att den kan ta sig fram lika människan, och fungera i samma miljöer som människan, den kan även använda samma typer av verktyg. I teorin kan den humanoida roboten göra allt som människan kan, i praktiken är det oerhört svårt att genomföra. Det är väldigt komplexa robotar där mycket kan gå fel, och de ställer höga krav på programmering och operatör.

I dagsläget ser vi ingen applikation för humanoida robotar inom bygg som är möjlig, ur utvecklings- och kostnadsperspektiv, att implementera inom en snar framtid.

Exempel på applikationer med humanoida robotar:

- Assistering och räkning av verktyg och material
- Uppsättning av skivmaterial
- Klinkersättning

### *Artificiellt exoskelett*

Exoskelett påminner om en rustning som man sätter på sig och som förstärker människans kapacitet. Oftast i form av att göra oss starkare och uthålligare. Ett artificiellt exoskelett styrs av människan som har det på sig, och har därför inte komplexiteten av att behöva programmeras för olika situationer. Exoskelett kan vara små och endast förstärka en enskild led eller muskel hos människan, till att täcka hela kroppen.

Utvecklingen av exoskelett för bygg sker väldigt snabbt just nu, med flera spännande produkter som närmar sig marknaden, exempelvis Bioservo. Bioservo meddelade tidigare i år att de säljer fem stycken Ironhand (Handske med robotiksystem som stöttar vid greppintensiva arbetsmoment) till byggmaskinuthyrningsföretaget Loxam. (Bioservo, 2019)

En utmaning med exoskelett är energiförsörjningen, och hur den kan garanteras på ett bra sätt i olika miljöer. I stationära arbetsområden kan energiförsörjning lösas med en inkopplad strömkabel, men i mer rörliga situationer blir kabeln snabbt en begränsande faktor. I takt med att batterier blir bättre och bättre blir de en allt mer en reell lösning.

Exoskelettet är till för att assistera människan, men då inga människor är identiska i sin rörlighet och rörelsemönster så är det svårt att skapa generella exoskelett.

Exempel på applikationer med exoskelett:

- Assistering vid greppintensiva arbetsmoment, vibrationsmoment och tunga lyft
- Assistering vid montage, där komponenter behöver hållas på plats under längre tid
- Assistering vid repetitiva uppgifter, t.ex. skruvning av skivmaterial

### *Drönare*

Drönare är en liten obemannad luftfarkost som kan flyga autonomt eller fjärrstyras. Drönarna finns i storlek av stor variation, och delas in i tre olika kategorier där kategori 1 får väga upp till 7 kg och flygs inom synhåll för piloten. Den här sorten är vanligt förekommande i detaljhandeln. Kategori 2 väger mellan 7-25 kg och flygs inom synhåll för piloten, medan kategori 3 flygs utom synhåll för

---

<sup>10</sup> <https://en.wikipedia.org/wiki/ASIMO>, 2019-12-16

<sup>11</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Atlas\\_\(robot\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Atlas_(robot)), 2019-12-16

piloten.<sup>12</sup> Generellt så är drönare versatila och kan användas till många olika arbetsmoment. Som första insteg inom bygg har de börjat användas för informationsinhämtning så som skanning och fotografering av miljöer och byggplatser. Tester finns även där de används för att torr-mura med lättare byggblock.

### 5.3. Robotar och Artificiell Intelligens

Artificiell Intelligens (AI) är under stark utveckling och används mer och mer inom olika områden och applikationer. AI kan givetvis paras med alla typer av robotar. Än så länge är AI mest utvecklat inom bildbehandling, och det är just där vi ser de första applikationerna inom bygg (Bard, 2018). Där kameror har monterats på robotar för att med hjälp av AI kunna utföra kvalitetskontroller på gjutna prefab-element. Här är det alltså AI-algoritmen i sig som är huvudsaken, men man kan ju också tänka sig att robotar kommer att bli bättre på att navigera och ta sig runt i komplexa miljöer med hjälp av AI för att sen utföra sin huvudsakliga syssla som kanske inte alls är AI-assisterad.

Forskning och utveckling sker även på att använda AI fr att förenkla programmeringen av roboten. Tanken är då att man via haptisk programmering kan hjälpa roboten att förstå vad den behöver göra för att lösa uppgiften. Förenklad programmering har stor potential för implementeringen av robotik och automatisering inom bygg. (Brell-Cokcan & Stumm, 2018)

AI kan även användas för att låta roboten autonomt utforska och lära sig hur den kan utföra komplexa uppgifter, där bästa lösningen kan vara svår att förutse eller simulera. Roboten närmar sig då hur en människa löser problem, genom direkt återkoppling och intuition. (Kilian & Wu, 2018)

### 5.4. Resultat

Sammantaget har de olika typerna av robotar och maskiner olika användningsområden, såsom:

- Lyftkranar för vertikala lyft och långsam hantering över stort område utomhus.
- Gantryrobotar för snabb hantering och vertikal åtkomst över medelstort område.
- Artikulerade (SKM) robotar för klassiska inomhusarbeten inom tillverkningsindustrin.
- Parallella (PKM) robotar för stadiga verktygsrörelser från sidan över medelstora ytor.
- Hybrida (HKM) robotar för lättviktiga armar med låg tyngdpunkt för mobilitet.

De tekniker som har identifierats redovisas nedan, (Tabell , 2 och 3) med beskrivning av inom vilka arbetsmoment de är aktiva. Utöver detta beskrivs även teknikens Technology Readiness Level (TRL) och utvärderingen enligt kriterier beskrivna i kapitel 3.2.

Notera att bedömningen avser den uppskattade potentialen för tekniken att åstadkomma förändring inom området, och bedömer inte uppmätt utfall. Tekniker med högt betyg (3) i någon kategori är markerad med fet stil i tabellen nedan.

---

<sup>12</sup> [https://sv.wikipedia.org/wiki/Dr%C3%B6nare\\_\(luftfartyg\)](https://sv.wikipedia.org/wiki/Dr%C3%B6nare_(luftfartyg))

PROCESS/TEKNIK MATRIS – Fjärrstyrda och automatiserade maskiner																							
TEKNIK	PREFAB							BYGGPLATS							TRL	Produktivitet	Arbetsmiljö	Kvalitet	Produktinnovation	Ekologisk hållbarhet			
	Logistik	Formar	Armering	Ingjutningsgods o -installationer	Betongegenskaper	Gjutning	Ytbehandling & efterarbeten	Kvalitets-säkring	Logistik	Utsättning	Prefabmontage	Stämp & bockrygg	Formar	Armering							Ingjutningsgods o -installationer	Betongegenskaper	Gjutning
Lyftoket Humlan									o	X								7	1	3	2	0	0
Självklättrande formar											o	X						9	2	3	0	0	0
The rising factory	o							o		o	o	o					o	9	3	3	1	0	2
Utsättningsroboten ArchiBot								X										4	3	0	1	0	0
Radiostyrd betongfördelare och transportmaskin													o	o	o	X		9	2	3	0	0	0
Självstyrande betongpump													o	o	X			4	2	3	0	0	0
Ytbearbetning: Glättning, slipning, städning				o	o	X	o							o	o	X	o	8	3	3	1	0	0
Fjärrstyrda bandmaskinen Rollit																		9	2	2	2	0	0
Laserstyrd rotormaskin				o	o	X	o							o	o	X	o	4	2	3	1	0	0
Smart dynamisk glidformsgjutning		X	o	o	o	X	o											4	2	1	1	3	3
Stickade gjutformar	o	X	o	o	o			o				X	o		o	o		2	2	1	1	3	3
CNC-frästa gjutformar av is	o	X	o	o	o	o												3	-	-	-	2	-
Formbord: DoKart										X	X							9	3	3	0	0	0
Förlös truck: Robo-carrier	X							X										6	2	2	0	0	0

Tabell 2: Teknik/Process-matris – Fjärrstyrda och automatiserade maskiner. För mer utförlig dokumentation av respektive teknik se bilaga 2. För vissa tekniker saknas processindikering, detta beror på att tekniken är så generellt beskriven att process inte kan definieras.



PROCESS/TEKNIK MATRIS - Industriella robotar från tillverkningsindustrin																								
TEKNIK	PREFAB							BYGGPLATS							TRL	Produktivitet	Arbetsmiljö	Kvalitet	Produktinnovation	Ekologisk hållbarhet				
	Logistik	Formar	Armering	Ingjutfningsgods o -installationer	Betongegenskaper	Gjutning	Ytbehandling & efterarbeten	Kvalitets-säkring	Logistik	Utsättning	Prefabmontage	Stämp & bockrygg	Formar	Armering							Ingjutfningsgods o -installationer	Betongegenskaper	Gjutning	Ytbehandling & efterarbeten
<b>SKM / SERIEKOPPLADE MASKINER</b>																								
Glödtrådsskärning av polystyrene formar		X																9	2	1	3	2	0	
Robotiserad slipskärning		X					X											8	1	1	3	2	0	
Najning av armering		o	X	o								o	X	o				6	2	2	2	3	-	
Mesh Mould												X	X	o	o	o	o	7	1	1	0	3	3	
In Situ Fabricator												X	X	o				4	1	3	1	2	1	
Mobil Svetsningsrobot									X				X					6	-	-	-	-	-	
Ytbearbetning av blöt betong					o	o	X	o										4	0	3	2	2	1	
Digitalt styrd kemikalieinjektion		o			o	X	o	o										4	1	0	0	3	0	
Hydrauliskt formade gjutformar		X	o	o	o	o	o											4	2	2	3	2	2	
Extruderande 3d-printning		o	o	o	o	X	o	o				o	o	o	o	X	o	o	4-9	2	2	1	3	2
Robotiserad sprutbetong		o	o	o	o	X	o	o				o	o	o	o	X	o	o	4-9	2	1	0	2	2
3d-printade och cnc-frästa gjutformar i vax		X	o	o	o	o	o											9	2	0	3	3	2	
Extruderande printning på 3d-topografi		o	o	o	o	X	o	o				o	o	o	o	X	o	o	2	-	-	-	3	-
<b>PARALLELLROBOTAR</b>																								
Extruderande printning med Delta		o	o	o	o	X	o	o				o	o	o	o	X	o	o	6-9	2	2	1	2	2
Parallellrobot Gantry-Tau																		4	-	-	-	-	-	
<b>LINROBOTAR</b>																								
Kabelrobot																		3-6	-	-	-	-	-	
<b>GANTRYMONTERADE VERKTYG</b>																								
Partikelbäddsprintning		o	o	o	o	X	o					o	o	o	o	X	o	o	6	2	0	0	3	0
Småskalig partikelbäddsprintning av formar																		6	2	0	0	3	0	
Extruderande printning		o	o	o	o	X	o					o	o	o	o	X	o	o	2	2	1	2	2	-
Najningsrobot		o	X									o	X					9	3	2	0	0	0	
Armeringsrobot		o	X									o	X					5	3	2	0	0	0	

Tabell 3: Teknik/Process-matris – Industriella robotar från tillverkningsindustrin. För mer utförlig dokumentation av respektive teknik se bilaga 2. För vissa tekniker saknas processindikering, detta beror på att tekniken är så generellt beskriven att process inte kan definieras.

PROCESS/TEKNIK MATRIS - Servicerobotar																									
TEKNIK	PREFAB						BYGGPLATS						TRL	Produktivitet	Arbetsmiljö	Kvalitet	Produktinnovation	Ekologisk hållbarhet							
	Logistik	Formar	Armering	Ingjutfningsgods o -installationer	Betongegenskaper	Gjutning	Ytbehandling & efterarbeten	Kvalitets-säkring	Logistik	Utsättning	Prefabmontage	Stämp & bockrygg							Formar	Armering	Ingjutfningsgods o -installationer	Betongegenskaper	Gjutning	Ytbehandling & efterarbeten	Kvalitets-säkring
<b>DRÖNADE (UAV)</b>																									
Sprutbetong med drönare													o		o	X	o			3	1	1	1	3	-
Pick & Place									X											4	2	2	1	3	-
Drönarassisterad kvalitetskontroll							X											X		7	2	3	3	0	0
<b>EXOSKELETT</b>																									
Exoskelett								X	X								X	X		2-8	2	3	0	0	0
Humanoid Skivsättare																	X			3	2	3	0	0	0
Supernumerary Robotic Limbs										o	o	o	o				o		3-7	3	2	0	0	0	
Iron Hand		o	o	o		o	o			o	o	o	o	o		o	o		9	1	3	0	0	0	
<b>ROBOTAR &amp; AI</b>																									
Robotiserad bildanalys							X										X		4	2	2	2	0	0	
Haptisk programmering																			4	-	-	-	-	-	
Verifikation av byggställningar																			2	2	3	3	-	-	

Tabell 3: Teknik/Process-matris - Servicerobotar. För mer utförlig dokumentation av respektive teknik se bilaga 2. För vissa tekniker saknas processindikering, detta beror på att tekniken är så generellt beskriven att process inte kan definieras.

Matriserna ovan belyser var fokus ligger hos de tekniker som är under utveckling inom branschen just nu, och som har potential att ta sig ut på marknaden inom relativt snar framtid. Generellt så har de tekniker som är av mer disruptiv karaktär, och därmed påverkar en större del av värdekedjan och kanske även arbetsmoment, lite längre till implementering, men de har också större möjlighet att påverka flera av utvärderingskriterierna.

Relativt behovsanalysen så finns det inom behov 1) *Uppföljning och informationsåterkoppling* stora möjligheter för de flesta av teknikerna att möta behovet. Digitalisering och robotisering medför i princip alltid en ökad och konkretiserad informationshantering. Behov 2) *Den fysiska arbetsmiljön* möts även den av många av teknikerna då det både finns tekniker som utvecklas för att direkt möta detta behov, tex självstyrande betongfördelare, eller fjärrstyrda lyftok, och dels för att flera av teknikerna innebär att det mänskliga arbetet helt eller delvis tas över av robotar eller försvinner, tex formsättning och formbyggande försvinner som moment vid 3d skrivning i betong. Behov 3) *Kostnadsdrivande att producera unika delar och helheter* möts främst av de tekniker som står för en mer disruptiv transformation, och kräver en sammanhängande utveckling med flera involverade discipliner från design till fabrikation. Exempel på tekniker som möter det här behovet är olika innovationer för formsättning, t.ex. hydrauliska formar, eller 3d skrivning.

Teknikutvecklingen går ofta hand i hand med utveckling av de system, komponenter och material som roboten eller maskinen ska interagera med. Inom byggvärlden sker det kontinuerlig utveckling för att förenkla för byggarbetaren, och vissa av dessa innebär att det i förlängningen även blir enklare att automatisera och robotisera. Några exempel på sådan utveckling är det lätta formsystemet Duo<sup>13</sup> utvecklat av Peri som skulle kunna monteras med hjälp av en robot, riggen Jiggelo<sup>14</sup> för att svetsa armering utvecklad av nederländska Skew och systemet med bultade pelare och balkar som utvecklat av Peikko (Paananen & Suur-Askola, 2018). Dessa är några exempel av många där ett arbetsmoment har systematiserats på ett sätt som underlättar för vidare utveckling.

## 6. TEKNIKTESTER

För att undersöka och fördjupa förståelsen kring de utmaningar som uppstår vid automatisering och robotisering av manuella moment och processer så har ett tekniktest genomförts.

Ambitionen var att belysa problematiken med två olika tester, ett med robotmurning och ett med 3d-printning. Dock har det visat sig att 3d-printningsteknologin inte är utvecklad nog i Sverige för att ett test skulle kunna genomföras på ett tillfredsställande vis.

### 6.1. Robotmurning

Automation på byggarbetsplats är utmanande. Till skillnad mot traditionell industrirobotik och även prefabrikation, där robotar som är fast monterade i strukturerade celler hanterar ett planerat materialflöde, så flyttas istället roboten till nya arbetsplatser med unika utmaningar. För att få upp ett mervärde så måste introduktionen av automationsutrustning på arbetsplatsen ske effektivt, utrustningen måste kunna hanteras smidigt av icke-expert (gällande både automation och processkunskap), och processen måste kunna utföras robust utan för mycket felhantering. Bidragande till att möjliggöra detta är att redan vid designstadiet ta hänsyn till byggprocessens genomförande. Det genomförda tekniktestet har syftat till att undersöka möjligheten att få ett så direkt och obrutet informationsflöde som möjligt från design till tillverkning, genom att redan i designprocessen simulera, samt direkt exekvera, delar av en automatiserad byggprocess, genomförd med en vanlig industrirobot. Detta i syfte att möta behov kring effektivisering och ökad unicitet, genom att designen påverkas av byggprocessens möjligheter och begränsningar.

För genomförandet av tekniktestet har ett exempel på en informationskedja från design till produktion för en robotiserad murningsprocess implementerats. Torr-murning valdes då det är en relativt enkel process att studera i en labbmiljö som inte är anpassad för smutsig och blöt hantering. Hanteringen av andra betongprocesser, så som gjutning, är betydligt smutsigare och kräver labb avsett för detta ändamål. Digitala informationsflöden som innefattar hantering av (semi-)autonoma maskiner på byggarbetsplatsen kräver i nuläget både forskning och utveckling och kan inte anses standardiserat. Grundtekniker finns, men dessa är dåligt anpassade för byggrelaterade processer på byggarbetsplatsen (ostrukturerad miljö, personer som inte är experter på robotar i nära samverkan med maskin, ej tidigare automatiserade processer). Området kräver experimentell utvärdering för att bygga upp kunskap om hur teknik kan och bör integreras, både hårdvara men främst mjukvara. Den uppbyggda informationskedjan ska därför ses som ett utforskande exempel.

Även digital dokumentering av byggprocessen utfördes i testet. Utnyttjande av automation på byggarbetsplatsen kommer innebära en naturlig ökning av insamlad digital information, i och med att sensorer högst troligt kommer vara integrerade i automationslösningarna. Denna digitala

---

<sup>13</sup> <https://duo.peri.com/sv>

<sup>14</sup> <http://www.skew.nl/jiggelo-models>

information kan samlas in och lagras för senare bruk, men också utnyttjas direkt vid styrning av utrustning.

Ett antal frågeställningar har tagits upp vid genomförande av tekniktestet:

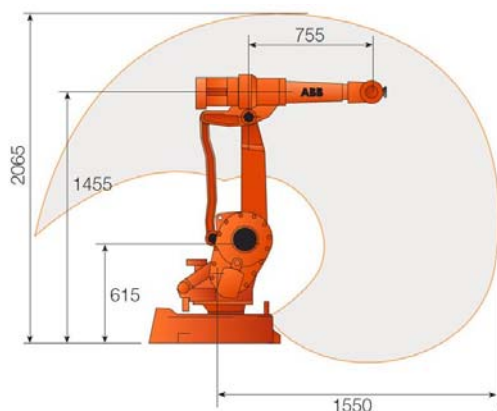
- Hur kan en informationskedja se ut vid en robotiserad byggprocess?
- Vilken information behöver roboten för att kunna utföra sitt uppdrag?
- Hur kan informationskedjan bli så effektiv som möjligt med ett minimerat antal manuella steg och överlämningar?
- Hur kan information och data kring robotens begränsningar tas in och förstås redan i designskedet?
- Hur kan robotsystemet ge feedback på den utförda byggprocessen tillbaka till designmodellen?

För att studera en så kort informationskedja som möjligt från design till produktion designades testet så att det utnyttjar verktyg vanliga bland arkitekter. I det valda verktyget undersöktes och utnyttjades befintlig funktionalitet för att skapa robotprogram för både simulering och genomförande i en uppställning i labbmiljö. Erfarenheter från implementeringen av det nödvändiga informationsflödet i denna miljö och genomförandet av testkörningar har gett grund till den avslutande diskussionen i detta avsnitt.

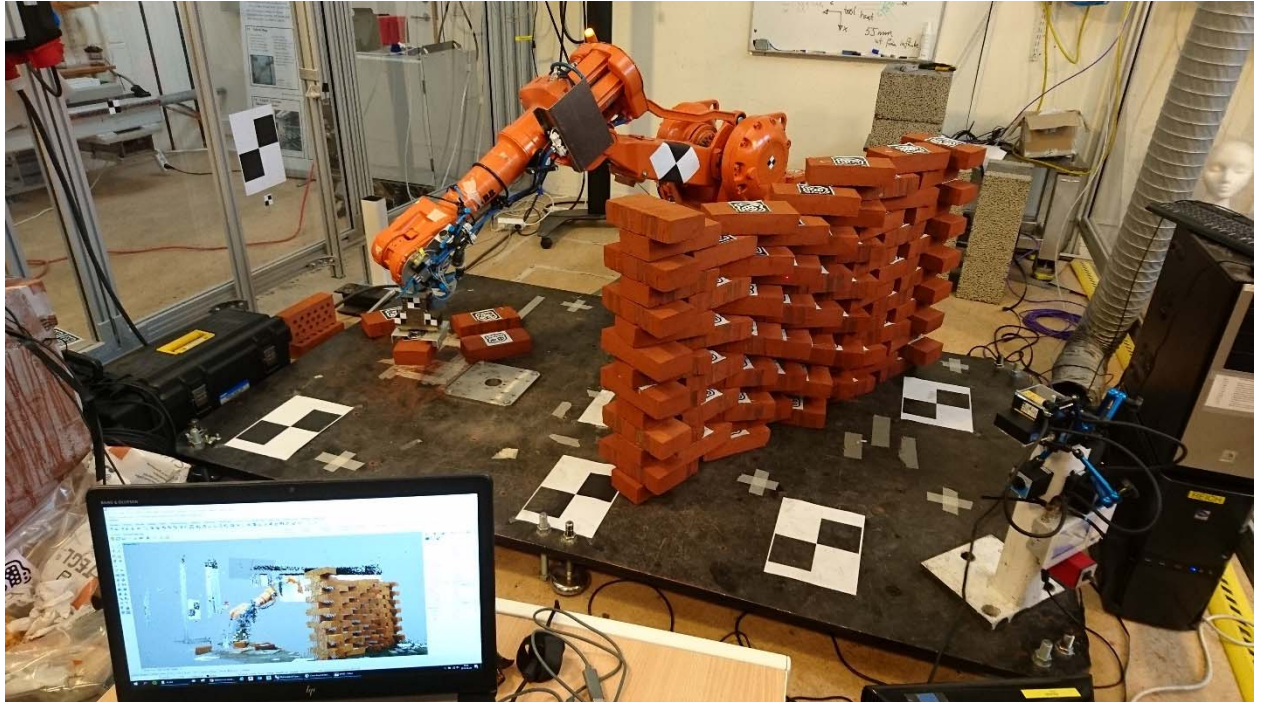
Test genomfördes vid två tillfällen tillsammans med en tvärdisciplinär arbetsgrupp, med kompetens inom både arkitektur och robotik.

### 6.3.1. Experimentuppställning

Den fysiska utrustningen är en uppställning i labbmiljö vid Robotlab LTH. Processen är torrurning av en mindre vägg med hjälp av en industrirobot från ABB modell IRB 2400 (Figur 10). Förenklade tekniker valdes för att minska tiden för implementation av murningsprocessen. Väggen designades av en arkitektstudent och programkoden för att styra roboten producerades automatiskt direkt i designprogrammet.



Figur 10: Arbetsområde för ABB IRB 2400 (Bild: ABB)



*Figur 11 Experimentuppställning. En industrirobot från ABB (IRB 2400) utrustad med gripdon för tegelsten plockar en tegelsten som identifierats med kamera och staplar till vägg definierad i ett arkitektverktyg. Det exekverande robotprogrammet är skapat i arkitektverktyget. I förgrunden ses inhämtad sensordata som dokumenterar byggprocessen.*

Testet gjordes med en ABB IRB 2400 robot på robotlabbet vid Lunds Tekniska Högskola, se Figur 11. Roboten utrustades med ett gripverktyg för att gripa tegelstenar. För identifiering av stenar som är möjliga att plocka användes en enklare webbkamera. Kameran identifierade stenarna med hjälp av en unik markör som har klistrats på varje sten (Kaltenbrunner & Bencina, 2007). För inmätning av hur roboten har greppat stenen användes en laserstation, utvecklad på robotlabbet, som identifierar stenens placering i förhållande till roboten i x-, y- och z-led. 3D-skanning av den murade väggen genomfördes med en djupsensor av typen Kinect, av märket Microsoft.

### 6.3.2. Informationshantering

Väggen designades och modellerades digitalt i den visuella programmeringsmiljön Grasshopper, som ingår i 3d-modelleringsprogrammet Rhinoceros 3D, (McNeel, Robert & Associates, 2017). Med hjälp av en plugin-programvara till Grasshopper kallad Robots, kan roboten simuleras i Grasshoppermiljön som en digital tvilling av den fysiska roboten, (Soler, 2019). Detta medför möjligheten att studera robotens beteende och begränsningar redan i designstadiet. ABB-roboten styrs av så kallad Rapidkod som genereras direkt i Grasshopper. Denna kod överförs sedan till styrdatorn för roboten, som när den körs får roboten att plocka och placera en eller flera tegelstenar, så att muren byggs upp.

Det utvecklades ett par olika metoder för att roboten ska veta var den ska plocka nästa tegelsten. Dels kan placeringen ske i ett visst bestämt mönster, t.ex. i raka travar, som modelleras upp exakt vad det gäller placering, orientering och storlek i den digitala tvillingen i Grasshopper. Koden för plockandet genereras då automatiskt för att överensstämma med denna placering av stenarna. Dock fokuserades arbetet på att undersöka en mer avancerad lösning där placeringen av stenarna från början är okänd för systemet. I detta system användes en kamera placerad i robotcellen för att registrera stenarnas placering och orientering och skicka denna data vidare live till Grasshopper och genereringen av Rapidkoden. Stenarna var taggade med markörer och registreringen skedde med

hjälp av ett program kallat reacTIVision (Kaltenbrunner & Bencina, 2007), med direkt kontakt med Grasshopper.

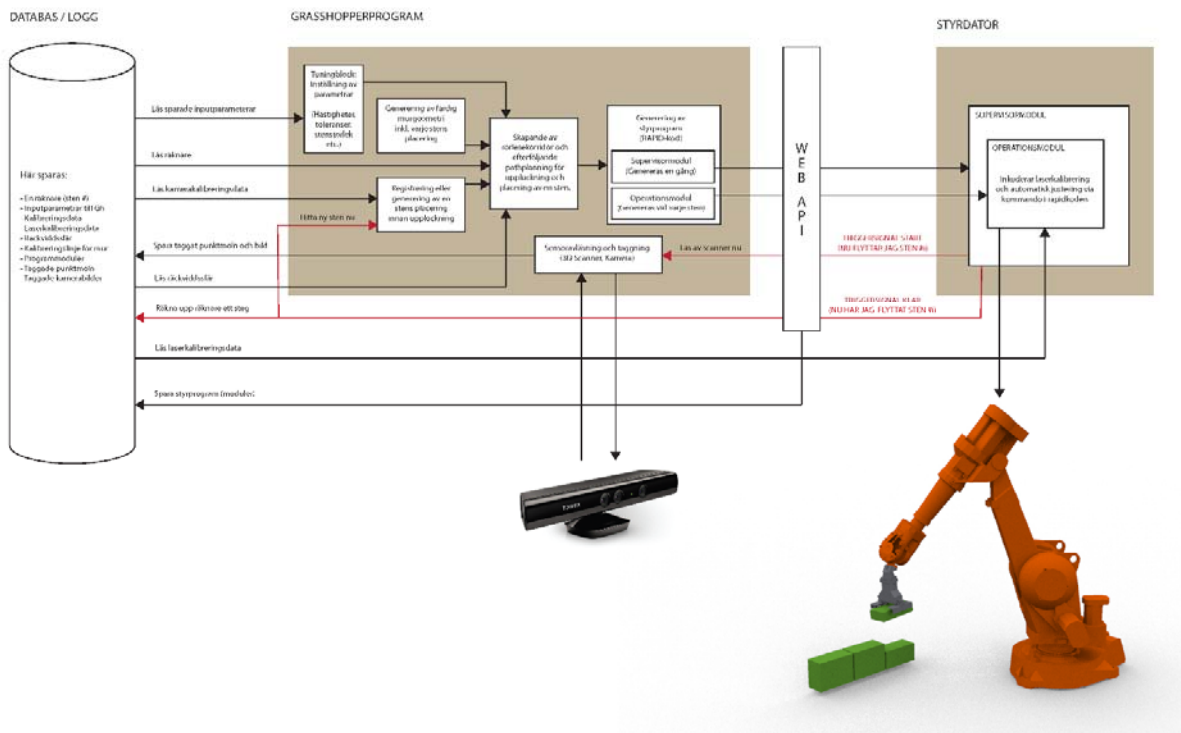
Inmätningen av stenens placering i gripdonet skedde via en laserbaserad mätstation mellan plockning och placering av stenen. Här kontrolleras hur stenen har gripits av roboten. Om placeringen i gripdonet skiljer sig från en antagen standardposition, alltså om roboten har gripit stenen snett på något sätt, kompenseras koordinaterna för placeringen automatiskt så att muren fortfarande byggs korrekt och inom toleransmarginalerna.

Den murade väggen skannades kontinuerligt med hjälp av Kinectsensorn och data överfördes i realtid tillbaka till Grasshopper och designmodellen. Tanken med detta är att avvikelser mellan den faktiskt murade väggen och den digitala tvillingen kan identifieras och att den digitala modellen kan justeras så att resten av muren uppförs inom tillåtna toleranskrav. Är avvikelserna alltför stora så avbryts byggnationen och felet får identifieras och justeras manuellt.

### 6.3.3. Vidare utveckling

Genom tekniktestet har en tydligare förståelse byggts för möjligheter och utmaningar med robotisering av murning. Det här är inte första gången som robotar har använts för tormurning, men det fanns inte aktiv kunskap och kompetens kring hur ett digitalt arbetsflöde från arkitekt till tillverkning skulle kunna se ut.

ROBOTMURNINGSSYSTEM - INFORMATIONSFLODE



Figur 12: Flödesdiagram för informationen i det utvecklade robotbaserade murningssystemet, med så obrutet och automatiskt informationsflöde som möjligt mellan designmodell och murad vägg. (Bild: FOJAB)

Tekniktestet utfördes enligt stycke 6.1.1 och 6.1.2 ovan och en designad vägg byggdes upp med hjälp av kamerasytemet och den automatiska genereringen av Rapidkod. Dock ingick fortfarande vissa manuella moment, som att överföra koden från datorn som generade den i Grasshopper till själva styrdatoren. I en vidareutveckling bör koden automatiskt överföras till styrdatoren via ett kommunikationsprotokoll, ett s.k. Web API. Information bör även automatiskt överföras på detta vis till en databas som loggar hela murningsprocessen och som lagrar parameterinställningar för simuleringen och kodgenereringen i Grasshopper. På så vis är det lättare att få repeterbarhet i murningsprocessen och logga information om eventuella fel etc. Inom det genomförda tekniktestet utvecklades ett komplett informationsflödesschema som inkluderade användandet av Web API och databas, se Figur 12.

Själva databasen utvecklades, men det återstår fortfarande att praktiskt implementera en del av kommunikationsmomenten i ovanstående figur, för att få ett helt obrutet informationsflöde på plats.

Arbetet utfördes i laboratoriemiljö och givetvis tillstöter det komplikationer för informationshanteringen vid överföring till en mer komplex och reell tillverkningsmiljö. Det finns dock goda förutsättningar för att implementera flödet inom prefab-industrin. Här kan ett robotsystem utvecklas för att t.ex. effektivisera och underlätta formsättning och ingjutning av tegelsten och dyl. i prefabelement.

#### 6.1.4 Iakttagelser

De gjorda iakttagelserna från testet kan klassificeras i tre delar; specifikt gällande den använda mjukvaran, experimentuppställningen och det digitala informationsflödet.

##### *Iakttagelser gällande för den använda mjukvaran*

Testet utnyttjade CAM-funktionalitet (Computer Aided Manufacturing) tillhandahållet som ett plug-in till den visuella programmeringsmiljön Grasshopper i 3D-modelleringsprogrammet Rhinoceros. En modell av väggen och översättande av denna till ett robotprogram för simulering och genomförande uttrycktes som instruktioner i Grasshopper. Arkitekten kan därmed simulera en byggprocess relativt enkelt. Tre fall testades;

**Simulering av byggprocess i Grasshopper.** Detta fungerade överlag väl så länge en traditionell robotuppställning utnyttjades. Simulering av en process med krav på större arbetsvolym än roboten klarar av, så att roboten måste flyttas, fanns det inget specifikt stöd för i det för testet utvalda robotvertyget, dock finns möjligheten inom Grasshopper-miljön att utveckla den funktionaliteten. Generellt sätt kan man dock säga att hantering av stora arbetsvolym är ganska ovanligt i robotrelaterad programvara. Traditionell industrilösningar för att öka arbetsvolymen, så som att montera robot på en gantry, fungerar väl för prefab, men på en byggplats krävs troligen andra lösningar. I det använda verktyget saknades även funktionalitet för att automatiskt hantera robotspecifika begränsningar i rörelseförmåga, d.v.s. programmet kunde generera kod för rörelsemönster som den specifika roboten inte klarar av att hantera och roboten kunde alltså hamna i låsta lägen där den inte klarade av att fortsätta. Manuell hantering av dessa lägen kräver expertkunskap. I robottekniska termer rör det sig om singularitetspunkter, kollisionshantering och räckviddshantering. Automatisk hantering av sådana begränsningar är vanlig i annan robotrelaterad programvara och kan antingen tillhandahållas som ett mellanled mellan designmodell och robot, alternativt kan den funktionaliteten läggas till i Grasshopper-miljön.

**Styrning av robot från Grasshopper.** Detta test utformades för att utforska det specifika verktygets förmåga till direktstyrning av fysisk robotcell. För detta ändamål utökades skriptet i Grasshopper för att stödja ett datadrivet flöde med hjälp av ett Web API mot fysisk industrirobot enligt Figur 8, då det saknades stöd för detta i det befintliga verktyget. Testet indikerade att ett sådant stöd kan åstadkommas, antingen genom att skriva koden för detta ändamål i Grasshopper, vilket delvis

genomfördes i testet, eller genom att integrera mot annan programvara specifikt avsedd för styrning av robot.

**Dokumentation av byggprocess.** Under genomförandet av ovanstående test utforskades även dokumentation av byggprocessen via insamling och lagring av information från en instrumentering av cellen. Punktmoln samlades in under genomförandet av byggprocessen och lagrades undan för framtida referens. För att göra informationen som samlades in sökbar genomfördes en id-hantering och grundsortering som kopplade olika lagrade filer mot korresponderande specifika byggoperation. Användning av denna information för återkoppling i byggprocessen utvärderades inte inom testet men diskuterades inom gruppen närvarande vid testet. En kunskapsbank med dokumenterade genomförda byggprocesser kan ha mervärde i designprocessen, men detta återstår att utvärdera.

#### *Iakttagelser gällande experimentuppställningen*

Labbmiljön som utnyttjades för testet är ej klassad för hantering av smutsiga och blöta processer. Hantering av en betongprocess eller vått murbruk var därför inte möjlig att genomföra. Därför valdes torrmurning som process att undersöka.

Uppställningen som sådan innehåller dock inslag som är allmängiltiga både för robotceller och för robotautomation av byggprocesser:

**Sensorer för styrning** för att hantera osäkerheter och toleranser i en delvis okänd miljö. I testet utnyttjades en sensor för plockning av godtyckligt utplacerad och staplad mursten.

**Digital integration** mellan programvaror och dataflöden. I testet implementerades kommunikation mellan robotens styrskåp, Grasshopper och en databas för att generera ett informations- och arbetsflöde som genomförde specifika delar av byggprocessen. I testet togs det fram lösningar ad hoc för att etablera det nödvändiga arbetsflödet från verktyg till maskin, för genomförande av byggprocessen. En standard för denna typ av informations- och arbetsflöde behöver utvecklas.

**Anpassning av utrustning mot arbetsplatsens krav.** För testet utnyttjades en industrirobot avsedd för tillverkningsindustri. Denna omgärdades med säkerhetsanordningar som tillät en säker arbetsmiljö. Hur robotsäkerhet bör se ut på en byggarbetsplats är en delvis öppen fråga. Även nödvändigt skydd för utrustningen behöver anpassas för byggprocesser och miljöer. En industrirobot har idag adekvat skydd mot processer i tillverkningsindustrin, men roboten är knappast skyddad för arbete med betong eller klimatskyddad för arbete utomhus.

Robotlösningar behöver också tas fram för hantering av stora arbetsvolymen på byggplats. Befintliga lösningar baseras på fasta installationer som fungerar väl för prefab och tillfälliga fabriker, som t.ex. montering av robot på gantry. På byggplatsen blir krav på fasta installationer besvärliga och kostnadskrävande att hantera. Bra lösningar för att öka arbetsvolymen, så som mobila robotplattformar avsedda för byggarbetsplats, behöver utvecklas.

#### *Iakttagelser gällande det digitala informationsflödet*

Generellt så saknas standardiserade dokument för hur byggprocesser ska utföras på ett maskingenomförbart sätt. För att underlätta automation av byggprocesser behövs det dokumentation kring hur ett moment ska utföras. Denna kunskap finns idag i relation till manuellt utförda processer, och ibland endast som tyst erfarenhetsbaserad kunskap. För att roboten ska kunna utföra ett moment behöver den explicita instruktioner. De arbetsbeskrivningar som idag finns för manuellt utförda processer behöver omformuleras som robotbeskrivningar, och kopplas in i informationsflödet från digital designmodell till robotexekvering. Utöver detta krävs även detaljerade beskrivningar av materialflöde, uppställning av material och nödvändig utrustning för att roboten ska kunna utföra sitt arbete. En utvecklad formulering kring utformning av dokument



och dokumentstrukturer från design till byggprocess och tillbaka för designåterkoppling hade varit önskvärt, och behöver utvecklas tvärs över professioner och discipliner.

I testet utnyttjades en databas till att lagra undan det råa informationsflödet kontinuerligt, men utan den organiserande struktur som krävs för hållbarhet över tid och mellan olika verktyg. Flödesschemat i Figur 12: Flödesdiagram för informationen i det utvecklade robotbaserade murningssystemet, med så obrutet och automatiskt informationsflöde som möjligt mellan designmodell och murad vägg. (Bild: FOJAB)illustrerar informationsflödet som utvecklades och demonstrerades i testet. Informationen kan grovt klassificeras i fyra kategorier baserat på ursprung:

- Kalibrering
  - Kalibreringsdata för sensorer och vägg, så att dessa kan utnyttjas för inmätning (db: kalibreringsdata kamera och laser, kalibreringslinje för mur)
- Byggd produkt
  - Väggtillstånd, dvs vilken del av väggen som är byggd (db: räknare)
  - Murstensdata, dvs storlek och vikt (db: inputparametrar)
- Robot
  - Räckvidd
  - Exekverade program
- Process
  - Insamlad sensordata från processen (db: punktmoln och kamerabilder)

Ytterligare klassificering av informationen är lämplig för att kunna sätta ihop och återskapa data i rätt ordning, dvs a priori, när den skapades, vilket moment den tillhör etc.

Data som samlas in under byggprocessen kan sedan användas för att analysera avvikelser mellan den digitala modellen och det utförda resultatet. Vid betydande avvikelser så kan åtgärder tas, t.ex. exekveringen stoppas och felet åtgärdas manuellt eller påföljande processer justeras för att kompenseras för felet.

#### 6.3.4. Slutsatser

*Det som testet lyckades besvara gällande ursprungsfrågorna:*

- Hur ser ett exempel på informationskedja ut vid robotiserad byggprocess?
- Vilken information behöver roboten för att kunna utföra sitt uppdrag?
- Hur kan informationskedjan bli så effektiv som möjligt med ett minimerat antal manuella steg och överlämningar?
- Hur kan information och data kring robotens begränsningar tas in och förstås redan i designskedet?
- Hur kan robotsystemet ge feedback på den utförda byggprocessen tillbaka till designmodellen?

Det genomförda tekniktestet har utforskat befintlig teknologi tillgänglig för kopplingen design – byggprocess. Autonoma maskiner som hjälp vid byggnation, och även i underhållsfasen, kommer att vara verklighet i en nära framtid. Arkitekten och övriga projektörer kommer i design- och projekteringsfasen behöva ta hänsyn till maskinell tillgänglighet under en byggnads livscykel. Krav och tillgänglighet på lämpliga designverktyg för detta ändamål är inte förberett idag, men ansatser finns och utvecklas främst inom akademiska kontexter.

Processen som utnyttjats för detta test är visserligen ej relaterad till betongprocesser men slutsatsen torde, enligt författarna, bli liknande vid introduktion av autonoma maskiner i betongprocesser för prefabrikation.

En tidig slutsats är att det befintliga informationsflödet, baserat på en manuell byggprocess, kommer att förändras kraftigt vid en robotisering och detta tekniktest kan i viss mån anses ha undersökt nya moment, roller, kompetenser, verktyg och utmaningar som uppstår och ingår vid en robotisering.

Att lagra insamlad data från sensorer under byggprocessen lägger grunden till att bygga upp en digital tvilling av byggprocessen. En sådan tvilling kan användas till exempel för dokumentation och för att få spårbarhet i byggprocessen. Spårbarhet, att i efterhand kunna följa hur en specifik detalj tillverkades/byggdes och under vilka omständigheter, är ännu inte vanligt inom byggindustri men är praxis inom andra industrier, så som flygindustri.

Insamling av större informationsmängder på byggplatsen är i sin linda. Men det finns idag metrologiutrustning som skannar in sin omgivning i syfte att skapa en geometrisk kopia i dator. Drönare kan utnyttjas för att skanna in stora strukturer, då ofta i syfte att inspektera strukturen i underhållssyfte. Testet genomförde datainsamling, men utan analys, under murningsprocessen i syfte att bereda möjlighet att utforska möjligheter och begränsning i återkoppling av den här typen av information till arkitekt och designprocess. Utvärdering ryms tyvärr inte inom testet utan återstår för framtiden. Men, att ha tillgång till historisk data från genomförda byggprocesser öppnar spännande möjligheter, exempelvis genom att underlätta framtida underhåll, möjlighet till återkoppling inför ny design och kontinuerliga processförbättring.

## 7. 3D-SKRIVNING / ADDITIV TILLVERKNING I BETONG

### 7.1 Utvecklingen

Utvecklingen av 3d-skrivare som kan hantera betong har pågått under flera decennier, men har intensifierats markant sista 3-5 åren med allt fler aktörer involverade. Tekniken mognar kontinuerligt och stor potential för att förändra byggandet finns, inte bara genom att sänka kostnaderna, utan också ge större hållbarhet och ökad funktionalitet. Då tekniken bygger på en konvergens av ett antal olika kunskapsområden är tvärvetenskapligt utvecklingsarbete av stor vikt. Detta innebär att förstå och utveckla hur process, material och gestaltning fungerar som en helhet och hur dessa samverkar för att ge en bättre produkt och optimerad process. En av de utmaningar för 3d-skrivning i betong är just materialet, där det gäller att förstå och kontrollera hydratisering och reologi, införing av armering eller förstärkning och övergripande kopplingen mellan bearbetning, material och prestanda, både ur strukturellt perspektiv och hållbarhetssynpunkt.

### 7.2 Tekniken

#### 7.2.1 Materialdeponering

Det finns olika sorters tekniker för 3d-skrivare i byggnadsskala, med stora skillnader i användningen, uppbyggande eller syfte. För det första kan man skilja hur materialet positioneras och hårdnar. I pulverbäddstekniken deponeras ett skikt pulvermaterial över hela bäddens area och ett skrivarhuvud skriver ut en aktivator eller bindemedel på materialet där det ska vara hårt och bundet i slutkomponenten. Processen med pulverdeponering och bindning upprepas. Den färdiga komponenten grävs ut ur obundet pulvermaterial. (Figur 13 vänster)

Fördelen med utskriften i pulverbädden är att det är möjligt att skriva ut underskärningar och överhäng, då det obundna pulvret har en stödjande funktion under tillverkningsprocessen. Nackdelen är att en stor mängd material måste tas bort efter utskriftsprocessen. Processen är

arbetsintensiv, men överskottsmaterialet kan generellt återvinnas till väldigt stor andel. I dagsläget finns det inga pulverbäddstekniker som använder cementpulver.



Figur 13: vänster skrivning i pulverbädd (Bild: E. Dini <https://d-shape.com/>) höger betongutskrift i lager (Bild Mechtcherine- TU Dresden)

Den vanligaste tekniken för betong är extrudering (s.k. Liquid Deposition Modelling, LDM) där betongen deponeras färskt genom ett munstycke i lager på lager och objektet byggs skiktvis upp. I den här tekniken har man inget överskottsmaterial, dessutom görs materialdeponering och positionering i en och samma process. Men allt material som ska deponeras måste transporteras från blandningsenheten över till skrivarhuvudet och det ökar vikten som belastar traverserna. Det innebär större krav på stabiliteten och hållfastheten i traverssystemet. (Figur 13 höger) Till skillnad från pulverbäddstekniken så innebär LDM ofta en kompromiss mellan utskriftshastighet och upplösning, vilket gör att den i många fall är begränsad till en relativt låg detaljeringsgrad.

En annan nackdel i denna variant är att materialet måste ha en viss stapelbarhet, d.v.s. ett lager måste kunna bära nästkommande lager. Därmed måste materialet efter det ha passerat skrivarhuvudet snabbt bygga upp en hållfasthet som kan ta emot följande lager.

En ny teknik som är under utveckling är en blandning mellan 3d skrivning och sprutbetong. (Lindemann, Gerbers, Ibrahim, & Dietrich, 2018) Där man använder sprutteknik för att bygga upp objekt i lager på lager liknande en 3d skrivning. Tekniken är intressant då den kan komma runt en del av 3d skrivningens begränsningar som integrering av armering och att jobba med överhäng.

### 7.2.2 Skrivarsystem för betong

Som redan i avsnitt 5.2 beskriven finns olika tekniska lösningar för uppbyggande av 3d-skrivare för betong. Ganska vanligt är robotarmen som har som fördel en stor variabilitet för verktyg, så att ett deponeringsverktyg är lätt att anpassa. Även styrningssystem finns välutvecklad till förfogande. Därmed är robotarmen väl lämpad för forsknings- och utvecklings syfte liksom tillverkning av mindre objekt.

Gantrysystem har blivit etablerad inom 3d-skrivning med betong. Fördelen är en enkel uppbyggnad av skrivaren och den relativt stora bärkraften av systemet, så att deponeringsverktyg kan klara betong med upp till 16 till 32 mm maximal ballastkornstorlek. Nackdelen är att gantryt behöver vara större än det den ska skriva ut, och det kan vara svårt att komma åt och komplettera utskriften i efterhand.

Mera sällan använd är andra typer av robotsystem. Men italienska företaget Wasp<sup>15</sup> har byggt en 12 m hög parallellkinematisk manipulator för att bygga hus på ett hållbart sätt (Figur 14 vänster). Ryska företaget Apis Cor<sup>16</sup> använder ett mobilt skrivarsystem med en anordning med en lättvikts skjutstege på en hydraulisk höjddregulator för att skriva ut envåningshus. (Figur 14 höger) Men även kabelupp-hängda system diskuteras i litteraturen att använda som 3d-skrivare för betong.



Figur 14: vänster WASP Delta printer (<https://www.3dwasp.com/>) höger Apis Cor betong 3D skrivare (<https://www.apis-cor.com/>)

## 7.3 Teknikutvecklingen i Sverige

Trots att 3d-skrivning i betong länge har undersökts internationellt, och det idag finns flera byggnader uppförda med tekniken och ännu fler på väg, så har utvecklingen inte kommit särskilt långt i Sverige. Flera högskolor jobbar med 3d-printning för bygg i olika material, men Kungliga Tekniska Högskolan (KTH) har ett specifikt fokus på just betong.

### 7.3.1. KTH:s robotarm och materialutveckling

Inom europaprojektet ”InnoChain” införskaffade KTH Arkitekturskolan en robotarm (Kuka<sup>17</sup>) med syfte att 3d-skriva med olika byggmaterial så som leror och betong. Specifikationen är att betongskrivarsystemet, inklusive pump och munstycke, ska kunna skriva ut material med ballastkorn upp till 2mm. RISE CBI fick i uppdrag att ta fram ett material för denna skrivare.

Under projektets tidiga stadiet användes fraktionerad finsand med olika kornstorlekar. En kombination av olika varianter av finsand Baskarp 95, 20 och 15 användes för att se hur partikelstorleksfördelningen i ballastmaterialet påverkar de färska egenskaper av betongmaterialet. För de följande undersökningar användes sedan vanlig natur- eller krossballast. Ballasten siktades ner till en 2mm maximal kornstorlek.

I de första blandningarna användes Sika 45 som flyttillsatsmedel för att uppnå tillräcklig flytlighet i materialet. Sika 4000 valdes för att skapa en längre öppen förhållandetid. Att uppnå en god balans mellan de två tillsatsmedel var problematiskt framförallt vid byte av ballastmaterial, därför gjordes valet av att använda MasterGlenium 51. Att blanda in fibrer ger möjlighet att skriva ut en armerad betong i en process där traditionell armering är svår att inkorporera. Men fiberarmering modifierar tydligt konsistensen hos den färska betongen. Fiberarmering bidrog till en styvare konsistens, detta

<sup>15</sup> [www.3dwasp.com/en/](http://www.3dwasp.com/en/)

<sup>16</sup> [www.apis-cor.com](http://www.apis-cor.com)

<sup>17</sup> [www.kuka.com](http://www.kuka.com)

kunde observeras direkt genom sättmått med Hägermannkon. Betongblandningarna som innehöll fiberarmering hade större böjdraghållfasthet.

Användbara betongblandningar för 3d-skrivning har en hög pastaandel, d.v.s. cementandelen är större än hos vanliga bruks- eller betongblandningar. För att minska cementandelen gjordes undersökningar med flygaska, silicastoft och fin kalksten Limus 25. Det visade sig att blandningarna med silicastoft och flygaska har bättre arbetbarhet än med kalkstenpulver. Inom aspekten av god arbetbarhet och byggbarhet har man kommit fram med bruksblandningar som uppnådde godtagbara egenskaper och kvalitéer i både sina färska och hårdnade egenskaper.



Figur 15: "hand"utskrivnen testmaterial (batteridrivnen foggistol), RISE CBI

Nästa steg i undersökningarna var att förbättra arbetbarhet utan att förlora byggbarhet (stapelbarhet) i materialet (Figur 15). Ansats för det var att höja tillsatsen av flytmedel och motverka materialeseparation med förtjockande tillsatsmedel. Till detta användes bentonit och förtjockningsmedel BASF Starvis 3040F. För den hårdnade betongens egenskaper har tryckhållfasthet och krympning testats som visar på hur betongen fungerar i långvarigt bruk.

I denna fas av materialutvecklingen var skrivaren under uppbyggande och inte tillgänglig. Materialet skrevs ut med hand under användning av en foggistol. I fortsättningen gjordes pumptester med pumpen på robotarmen med det visade sig att materialet med 2mm ballastkornstorlek var för grovt och slitande för pumpen. Men med fraktionering till 0,5mm maximal ballastkornstorlek och justering av flytmedlet och förtjockningsmedlet testades 3d-skrivaren framgångsrik (Figur 16)

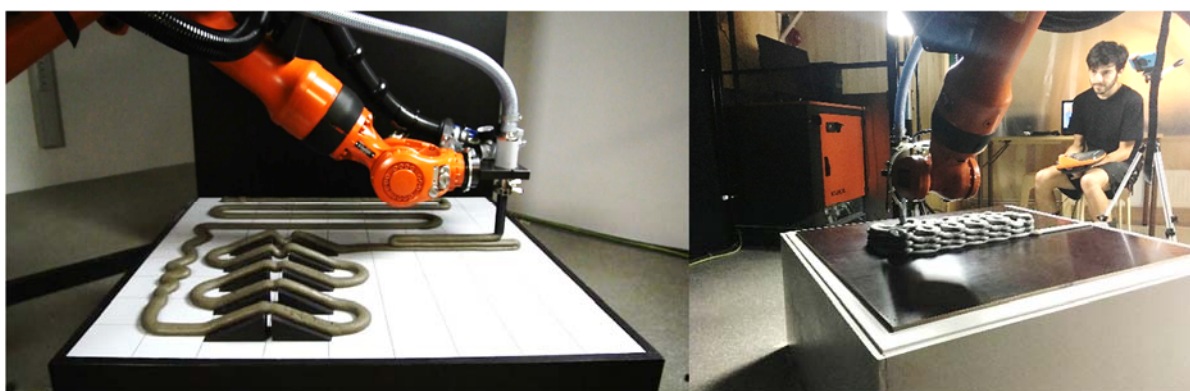


Bild 16: Betongskrivförsök med standardbanor och brobildning (vänster) och mönster i strukturer för hållfasthetsundersökningar (Westerlind, KTH Arkitekturskolan)

### 7.3.2 Tekniken i näringslivet

Ett privat initiativ i Sverige att bygga en 3d-skrivare för betong har startats av Tobias v. Haslingen i sitt företag ConcretePrint (<http://concreteprint.se>). Skrivaren är ett gantrysystem och pumpen och munstycke tillåter bruksmaterial med partikelstorlek 3-4mm. ConcretePrint siktar mot att under

2020 ha maskiner färdiga som kan skriva ut villor och radhus, men är i dagsläget på prototypstadiet.

## 7.4 Slutsatser

Inom de sista fem år har betongskrivandet tagit stora steg framåt och nuförtiden finns teknologin kommersiellt att köpa. Företag som Cobod, Bet Aram eller Total Kostum offererar betongskrivarteknik i olika storlekar. Generellt så ligger vi i Sverige långt efter i utvecklingen jämfört med andra länder.

Men tekniken är fortfarande ung och utvecklingen fortsätter. 3d skrivning i betong i full skala kräver större system med hög styvhet för att positionera material på rätt plats. För att säkerställa en nödvändig positioneringsnoggrannhet finns redan ansatser och lösningar inom byggteknikutvecklingen. I samma drag vidareutvecklas deponeringsverktyg för olika betongmaterial. Deponeringsverktyget utvecklades från ett enkelt rör där materialet pressas ut till ett multifunktionellt verktyg som kan formgiva, variera materialflödet, skära materialsträngen, dosera acceleratörer eller lägga samtidig armering under skrivprocessen. Utvecklingen går i riktning att 3d-skrivarsystem kan anpassas till det önskade betongmaterialet. Utvecklingen leder även till en ökad kontroll och upplösning, vilket medför möjligheter till ökad detaljering och möjlighet till funktionsintegrering i 3d-skrivna strukturer. Generellt medför 3d-skrivning produkter med en ökad geometrisk komplexitet och artikulerade estetiska uttryck utan att för den delen leda till en merkostnad.

Materialutvecklingen har kommit så långt, att det kan konstateras att det är möjligt att anpassa ett betongmaterial till ett skrivarsystem. Man har skaffat sig erfarenhet vilka färskbetongegenskaper ska nås för att fungera i olika pumpar och deponeringsverktyg. Mest är det den maximala ballastkornstorleken som sätter gräns för användningen i ett givet system. Utöver det är det möjligt att anpassa en stor materialvariation från högpresterande betong till vanliga betongkvaliteter där man ersätter delar av höga cementhalter med andra pulvermaterial som flygaska, silicastoft, finmalen kalksten eller pulveriserat mineraliskt avfallsmaterial. Denna utveckling är av stor vikt för att en cementbaserad teknik ska kunna vara konkurrenskraftig i en framtid där begränsning eller total eliminering av kortsiktiga koldioxidutsläpp blir allt viktigare.

Utöver material- och teknikutveckling finns stort behov att validera, simulera och optimera skrivprocesser liksom att simulera utskrivna objekt för att förutsäga objektets beteende under last i färskt och hårdnat tillstånd.

Om man nu kan anpassa skrivaren till materialet och materialet till skrivaren, varför finns det så få utskrivna betongkonstruktioner? Vad är hinder för en bred användning av 3d-skrivare i betong? Till en stor del finns svaret inom befintliga normer och standarder för byggmaterial och konstruktion. Detta gäller både de förväntningar som finns på marknaden (hos utförare så väl som slutanvändare) och de olika legala och branschdrivna standarder som styr byggandet. Ett omfattande utvecklingsarbete måste komma till stånd för att se över hur dessa kan anpassas för att ta hänsyn till 3d-skrivarteknikens förutsättningar och möjligheter.

Parallellt med utvecklingen av maskiner och material så har en allt större insikt vuxit fram att 3d-skrivandet ställer specifika krav på geometri och design, och tillåter nya estetiska uttryck. T.ex. kan en del av utmaningarna med att väggar knäcker under uppbyggandet åtgärdas genom att materialet inte deponeras i raka rader utan att en sinuskurvatur introduceras. Förståelsen för form, material och process i ett holistiskt system är ett aktivt och aktuellt ämne för forskning världen över, bland annat ETH i Zürich som tidigare nämnts, men även arkitektskolan på Lunds Tekniska Högskola jobbar aktivt med ämnet. Centralt för att lyckas med detta är att integrera designarbete med

produktionsprocess, och att arbete interdisciplinärt med de olika delarna som ett sammanhängande system.

## 8. FÖRUTSÄTTNINGAR & UTMANINGAR

Nedan följer en samlad analys av förutsättningar och utmaningar för automation och robotisering inom betongbyggandet.

### 8.1. Olika miljöer har olika förutsättningar

Tekniker identifierade inom projektet har utvecklats för att användas i olika moment och inom olika miljöer. Robotens miljö består av flera olika delar, och som har olika möjlighet att anpassas till roboten. Vissa saker är inneboende aspekter av miljön och kan inte påverkas, det kan t.ex. vara rumshöjd, eller väder och vind på byggplatsen. Medan andra saker som roboten interagerar med kanske kan anpassas, t.ex. greppvänliga moduler eller hur material har packats på en pall. Det kan underlätta att tänka på roboten, miljön den agerar inom och det den ska göra som ett helt system som ska utvecklas för att fungera ihop, och inte på roboten som en enskild teknik.

Generellt så skiljer utmaningarna ganska kraftigt åt mellan implementering av robotik och automation i fabriksmiljöer och på byggplats.

#### 8.3.1. På fabrik

Fabriksmiljöerna har stora likheter med tillverkningsindustrin i stort, där robotik har implementerats framgångsfullt under en längre tid, och är väl utvecklat. Fabriken har en relativt förutsägbar miljö och en hög repeterbarhet i uppgifterna vilket gör det enklare att installera och programmera robotar i den miljön. Det är även här de första stegen mot automation och robotisering inom bygg har tagits.

#### 8.3.2. På byggplats

Byggplatsen är i grunden en stökig miljö med hög grad av oförutsägbarhet, från väder och vind till människor och många olika processer som pågår samtidigt. Robotar i den här miljön behöver vara generalister som kan samverka med människan på ett enkelt och intuitivt sätt. De behöver vara tåliga för att klara utomhusmiljö, smuts och damm, samtidigt som de är agila och lättrorliga för att navigera i trånga och stökiga utrymmen.

#### 8.3.3. Mobila temporära fabriker på byggplats

Mobila fabriker som byggs upp temporärt vid eller på byggplatsen har nått ökad framgång senaste åren, och är ett försök att blanda det bästa från produktion i fabrik och på byggplats. Tillverkningen i nära anslutning av byggplatsen reducerar dyr och ineffektiv logistik, samtidigt som den ökar möjligheten för unika kundspecifika produkter. (Erwin Rauch, 2015)

I Storbritannien så har byggföretaget Mace<sup>18</sup> rönt stor framgång med temporära fabriker för byggandet av höghus. Deras så kallade Rising Factory<sup>19</sup> används vid byggandet av flerbostadshus och följer med byggnaden upp efterhand som den tar höjd.

Då den temporära fabriken är avskärmad från väder och vind, och har en högre grad av förutsägbarhet är det en miljö som lämpar sig väl för användandet av robotisering och automation.

### 8.2. Risker

---

<sup>18</sup> [www.macegroup.com](http://www.macegroup.com)

<sup>19</sup> [www.macegroup.com/projects/east-village-no8](http://www.macegroup.com/projects/east-village-no8)

I flera diskussioner har robotar kommit upp som lösning på problemet med att byggarbetsplatsen är en riskfylld miljö med bland annat många tunga lyft, repetitiva slitsamma uppgifter och fallrisk. Dock innebär roboten i sig även en risk för människor. I de miljöer där starka robotar har implementerats framgångsrikt så har de höga säkerhetsåtgärder och jobbar ostört av människor, tex vid löpande band. De utför då en väl definierad och förprogrammerad uppgift och produktionen stannar ifall en människa befinner sig inom arbetsområdet. Byggplatsen är i grunden stökig, oförutsägbar och robotarna behöver i stor utsträckning samarbeta med människor.

### 8.3. Transformativa respektive disruptiva teknologier

Förutsättningen för implementationen av olika tekniker är i hög grad avhängig av hur bred påverkan tekniken har. Från en transformativ teknik i sin enklaste form som endast påverkar ett moment under bygget och endast en profession, t.ex. ett automatiserat lyftdon, till breda disruptiva tekniker som påverkar hela värdekedjan och alla skeden från design till färdigt bygge, och vidare in i förvaltning och brukarskedet, t.ex. 3d-printning av hela byggnader.

De disruptiva teknikerna är självfallet svårare att implementera och har generellt sett en längre väg till marknaden, men har också generellt sett större potential att lösa flera parallella utmaningar och skapa mer värde.

### 8.4. Programmering och kunskap

Vid robotisering av tidigare manuella moment, behöver hantverkarens kunskap på något sätt överföras till roboten. Dagens arbetsflöde med en ritning, som beskriver geometriskt hur resultatet ska vara, och tillhörande arbetsbeskrivningar är inte tillräckliga för en robot att förstå. Den som idag utför arbetet förlitar sig på en mängd dold kunskap, som inte förmedlas aktivt via handlingarna. Denna dolda kunskap innefattar praxis, erfarenhet och förkroppsligad kunskap. Vid robotisering behöver vi förstå hur denna dolda kunskap kan förmedlas till roboten, och hur den ska påverka hur roboten utför ett arbetsmoment.

I takt med den tekniska utvecklingen av robotar behöver vi också utveckla modeller för representation och kommunikation med roboten. Denna representation behöver bland annat kunna tydliggöra vilka variationer i både utförande och resultat som kan förväntas, och hur roboten ska agera om ett moment hamnar utanför den givna variationen. Representationen behöver vara så tydlig och enkel att det snabbt går att identifiera avvikelser och fel, liksom den erfarna och kompetenta hantverkaren direkt ser om något har blivit tokigt utfört.

Byggarbetsplatsens unika och föränderliga förutsättningar gör att hård programmering av robotar inte är lämplig. Roboten behöver vara adaptiv, enkelt att programmera och att interagera med för de som arbetar runt omkring den. Ett förslag är att använda så kallad haptisk programmering, där människan kan visa roboten vad den ska göra genom att helt enkelt föra roboten genom rörelsen. Det finns även teknologi för att överföra kunskap kring kraft i rörelser från människa till roboten genom att helt enkelt låta människan visa hur momentet ska utföras med hjälp av digitaliserade verktyg som kan samla in data kring utförandet.

Utvecklingen av hur icke-programmerare kan programmera robotar kommer vara avgörande för implementerandet av robotar inom bygg.

## 9. IDENTIFIERADE TÄNKBARA APPLIKATIONER

Förslag på ett antal tekniker som skulle kunna hjälpa byggbranschen framåt med avseende på stommar till flerfamiljshus. Notera att förslagen listade nedan kan finnas utvecklade och



implementerade i andra länder eller branscher, men ännu inte fått genomslag inom svensk byggindustri. Flera av teknikerna beskrivs mer utförligt i bilaga 2 - Teknikskanning.

En läsning mellan den utförda behovsanalysen och den genomförda teknikskanningen ger oss några fokusområden där robotisering och automation framstår vara ett gott alternativ utifrån den möjliga nyttan. Sammanfattningsvis är det främst inom fem arbetsmoment som lämpliga teknologier har utkristalliserats; Montage, armering, gjutning, kvalitetskontroll och logistik.

## 9.1. Montage

Arbetsmomentet montage är idag ett av de stora riskfyllda momenten på en byggarbetsplats, där byggarbetare ska ta emot stora tunga prefabricerade betongelement och se till att de ställs ned i rätt läge. Teknik som underlättar vid det här momenten skulle ha stor tillämpbar nytta ute på byggarbetsplatsen.

### 9.3.1. Lyftdon (Humlan)

Vidareutveckling av lyftdon som sköter precisionsplacering av tunga element helt autonomt.

MÖJLIGHETER	UTMANINGAR
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Snabbare montage</li> <li>• Människor behöver inte befinna sig inom arbetsområdet för elementet utan kan övervaka från avstånd. Reducerar skaderisk.</li> <li>• Inmätning av placerade element, och informationsåterkoppling från lyftdonet kring elementets faktiska placering.</li> <li>• Potentiell återkoppling till leverantören kring elementets toleranser och kvalitetsnivå.</li> <li>•</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hur och när kopplas lyftdonet på?</li> <li>• Hur kan lyftdonet kompensera för vindbelastningar</li> </ul>

### 9.3.2. Infästningsrobot

Robot som hjälper till med fastsättning/säkring av prefabelement. Liten mobil enhet som kan skruva/svetsa fast element. Kan eventuellt fjärrstyras.

MÖJLIGHETER	UTMANINGAR
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Minskad risk för arbetsskador.</li> <li>• Kan det leda till förenklad nedmontering och återvinning av byggnader?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kräver viss produktutveckling kring att anpassa elementens infästning för roboten.</li> <li>• Behövs utveckling av infästningsmetodik: skruvning/bultning alt svetsning?</li> </ul>

### 9.3.3. Montage av lättviktsformar

Det finns redan utvecklade lättvikssystem för formsättning, t.ex. Peri, som är framtagna för att sättas samman manuellt. En tänkbara utveckling skulle vara att anpassa systemet för montage av robot istället. Här behöver roboten och formsystemet utvecklas parallellt.

MÖJLIGHETER	UTMANINGAR
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Snabb uppsättning av formar på byggplatsen.</li> <li>• Minskad risk för arbetsskador.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kräver utveckling av formsystem anpassat för roboten</li> <li>• Kräver utveckling av robot anpassad för byggplats och formsystem.</li> </ul>

## 9.2. Armering

Det finns flera initiativ bland annat AcrBots<sup>20</sup>, även i Sverige (Skanska<sup>21</sup> och Robotdalen<sup>22</sup>), att utveckla robotik för att automatisera armeringsarbeten. De vänder sig i första hand mot prefab-industrin, men behovet finns tydligt även för arbeten på byggsplatsen. Tekniken skulle även kunna anpassas till temporära fabriker där armeringsenheter produceras 'on demand'.

MÖJLIGHETER	UTMANINGAR
<ul style="list-style-type: none"><li>• Minskad risk för arbetsskador; reduktion av tunga lyft och repetitiva uppgifter.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Utvecklade tekniker riktar sig mot prefab. Kan de utvecklas mot byggsplats eller temporära fabriker?</li></ul>

## 9.3. Gjutning

Inom gjutningen så har främst två stora behov utkristalliserats, det ena handlar om arbetsmiljö, och det andra om produktivitet. Vad gäller arbetsmiljö så är det främst tunga och slitsamma arbetsmoment som skulle kunna reduceras med hjälp av automation, tex automatiska pumpslangar och automatisk vibrering. Inom produktiviteten så finns ett tydligt behov att kunna producera mer optimerade strukturer, och minska onödigt materialanvändande. Detta drivs främst ur ett klimatperspektiv. Exempel är armering anpassad efter faktisk lastfördelning, betongplattor av varierande tjocklek och pelare med varierat tvärsnitt. För att klara detta behöver hela informationskedjan ses över, det hjälper inte att stoppa in en robot, om man inte också har designat en mer optimerad struktur. Idag ligger dock flaskhalsen i produktionen och inte i design- och projekteringsfasen för mer komplexa och optimerade geometrier. Nedan följer några förslag på intressanta teknologier att utveckla och implementera.

### 9.3.1. Dynamisk glidformsgjutning

Robotiserad glidformsgjutning där formen är parametriskt kontrollerbar för att ge varierat tvärsnitt av pelare under gjutningen.

MÖJLIGHETER	UTMANINGAR
<ul style="list-style-type: none"><li>• Reducera klimatavtryck genom resurseffektivitet. Material används där det behövs.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Utveckling av glidform och rigg</li><li>• Betongegenskaper</li><li>• Armering</li><li>• Design och projektering behöver utvecklas för att optimera pelarformen.</li></ul>

### 9.3.2. Robotiserad bearbetning av våta betongytor

Robotiserad ytbearbetning av betongytor på prefabelement. Görs t.ex. med gantrymonterad industrirobot på fabrik. Ersätter manuellt moment av ytbearbetning och möjliggör för större variation och djup i bearbetningen. Påverkar design/projektering och färdigt resultat.

MÖJLIGHETER	UTMANINGAR
<ul style="list-style-type: none"><li>• Arbeta in mervärden i väggelement, t.ex. självskuggning eller bullerdiffusering.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Betongegenskaper</li><li>• Kraftåtergivning</li></ul>

<sup>20</sup> <http://tybotlcc.com>

<sup>21</sup> [www.skanska.se/om-skanska/press/nyheter/robotar-effektiverar-arbetsplatsen/](http://www.skanska.se/om-skanska/press/nyheter/robotar-effektiverar-arbetsplatsen/)

<sup>22</sup> <https://www.robotdalen.se/>

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Med utökad möjlighet att ornamentera och bearbeta betongen minskar behovet av sekundära fasadinklädningar, och på så vis ökar produktivitet och klimatavtryck minskar. Dock bildas visst spill vid bearbetningen som motverkar klimatvinsten.</li> <li>• Kan kopplas till <i>machine learning</i> och haptisk programmering av robot för att efterlikna hantverkarens interaktion med materialet.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kvalitetskontroll</li> <li>• Betongspill uppstår, vilket innebär ökat klimatavtryck.</li> </ul>
---	--

### 9.3.3. Robotiserad betongfördelning, vibrering och efterbehandling

Gjutning och vibrering av betong är arbeten som skulle kunna automatiseras med hänsyn till arbetsmiljö. Här finns många tekniker som är mer eller mindre utvecklade och som tillsammans tar sig an processen från betongspump, betongfördelning, vibrering och efterbehandling. Exempel är den automatiserade pumpslangen utvecklad av Reich<sup>23</sup>, den radiostyrd betongfördelaren Line Dragon<sup>24</sup>, och fjärrstyrda bandmaskinen Rollit från Form Consult. Både Rollit<sup>25</sup> och Line Dragon finns kommersiellt tillgängliga.

<p><b>MÖJLIGHETER</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kan ersätta tunga och slitiga moment</li> <li>• Kan stödja informationsåterkoppling och ge utökad information kring processen.</li> </ul>	<p><b>UTMANINGAR</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tillgängliga prototyper finns, men oklart varför utvecklingen och implementering har avstannats. Mer information krävs för att identifiera utmaningar för de enskilda prototyperna.</li> <li>• Sätta ihop flera automationslösningar till ett helt system som kommunicerar med varandra.</li> </ul>
--	---

## 9.4. Informationsåterföring

Digital scanning och kontroll av ingjutningsgods, armering, förtagningar etc. i väggar/valv innan gjutning. Kan ske på fabrik med kamera monterad på industriell robotarm eller gantry som kan söka av hela elementets yta, eller på bygget med hjälp av drönare.

### 9.3.1. Digital kvalitetskontroll av betongytan hos prefabelement

Bildanalys genom artificiell intelligens för att identifiera kvalitetsbrister i ytan av betongelement (Bard, 2018). I prefabfabriken monteras en kamera på en rörlig arm, t.ex. en industrirobot, en parallellrobot eller ett gantry, så att den kan scanna av hela elementets yta från relativt nära håll.

<p><b>MÖJLIGHETER</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kvalitetskontroll av element (sprickor, mått, håltagningar, kulörvariation, mm.)</li> <li>• Informationsåterföring till produktionen kring när, var och hur kvalitetsbrister uppstår, genom samkörning av data från produktion och kvalitetskontroll.</li> </ul>	<p><b>UTMANINGAR</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kräver stort bildunderlag för att träna den artificiella intelligensen</li> </ul>
---	---

<sup>23</sup> <https://reichag.com>

<sup>24</sup> <https://sv.lindec.com/product/line-dragon-concrete-placer>

<sup>25</sup> <http://www.rollit.se/rollit-bandmaskin/>

### 9.3.2. Drönarassisterad scanning

Digital scanning och kontroll av ingjutningsgods, armering, förtagningar etc. i väggar/valv innan gjutning. Kan automatiskt jämföras med bygghandling/3d-modell för att säkerställa att allt är utfört innan nästa moment påbörjas. Tekniken används redan i viss utsträckning, men främst som dokumentation för att senare kunna gå tillbaka och identifiera var saker finns vid eventuella håltagningar och dylikt.

MÖJLIGHETER	UTMANINGAR
<ul style="list-style-type: none"><li>• Snabb informationsåterföring kring vilka moment som har slutförts, och ifall de stämmer överens med bygghandlingar.</li><li>• Automatisk identifiering av olika objekt, tex ingjutningsgods, men även verktyg.</li><li>• Kan potentiellt underlätta uppskattningen av hur mycket betong som går åt och minskar därmed spill.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Kräver stort bildunderlag för att träna den artificiella intelligensen</li><li>• Svårt med stökiga och oförutsägbara miljöer</li><li>• Batteritiden hos drönare är begränsad. Mobila laddningsstationer kan krävas.</li><li>• Ett tränat öga identifierar snabbt oväntade saker i en miljö, hur överför man kunskap till AI kring vad som är väntad information, vad som är normala avvikelser och vad som är felaktiga avvikelser inom en stor informationsrymd?</li></ul>

## 9.5. Logistik

Avgränsningen som sattes upp för det här projektet innebär att logistik ligger i periferin och inte har undersökts i någon större utsträckning, dock har det i diskussioner under arbetets gång ofta kommit upp och det är tydligt att stor effektivisering och produktivitetshöjning skulle kunna åstadkommas om logistiken automatiserades i högre utsträckning.

Nedan följer några förslag på intressanta teknologier att utveckla och implementera.

### 9.3.1. Automatiserad materialframkörning

Automatiserade truckar för framkörning av material. Eventuellt kan lärdomar och inspiration tas från hur automatiska truckar fungerar i lagermiljöer.

MÖJLIGHETER	UTMANINGAR
<ul style="list-style-type: none"><li>• Kör fram rätt material till rätt plats vid rätt tillfälle.</li><li>• Bättre koll på vad som går åt och vad som används var och när. (infoåterkoppling)</li><li>• Kan fungera som en förlängning av den "smarta" containern<sup>26</sup></li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Säkerhet när människor och truckar ska samsas</li><li>• Byggplatsens stökiga och oförutsägbara miljö</li><li>• Ojämna golv</li></ul>

### 9.3.2. Den temporära fabriken

Temporära fabriken finns som olika koncept, dels där fabriken byggs upp på en byggplats, och dels där den byggs upp i närheten av och servar flera byggplatser. I båda fallen så ser projektgruppen en förenklad introducering av robotar jämfört med den traditionella byggplatsen. Genom uppsättandet av tillfälliga fabriker så har en markant produktivitetshöjning kunnat påvisas (Mace, 2018). Utöver

<sup>26</sup> <https://www.qlocx.com/bygglogistik>

produktivitetseffekter så kommer produktionen även närmre bygget, och därmed minskar transportererna.

MÖJLIGHETER	UTMANINGAR
<ul style="list-style-type: none"><li>• Ökad produktivitet genom att enklare ha rätt sak, på rätt plats vid rätt tillfälle.</li><li>• Minskade transporter</li><li>• Förbättrad arbetsmiljö för byggarbetarna då fler moment kan ske inom fabriken.</li><li>• Reperterbarhet och kunskapsåterföring mellan projekt</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Kräver omfattande investeringar i strukturer och kompetens innan igångsättning.</li><li>• Svårt för mindre aktörer att implementera</li></ul>

## 10. SLUTSATSER

Robotisering och automatiseringen är idag relativt väl utvecklad, och har implementerats med stor framgång inom andra industrier, och till viss del inom bygg. Det finns många tekniker och applikationer tillgängliga som kan möta en del av de behov som branschen har.

Generellt så visar många av de tekniker och applikationer som har identifierats i arbetet att vidare utveckling krävs främst inom interaktionen mellan människa och robot, samt med att göra robotar robusta nog för de ganska tuffa förhållandena som byggplatser och fabriker innebär, (Dubor, o.a., 2018).

Genom att byta ut manuella moment på byggplats eller i fabrik så kan vinster göras till viss utsträckning. Implementering av robotik inom fabriksmiljöer och för prefabelement uppskattas kunna ge mervärden i form av effektivare produktion, förbättrad arbetsmiljö och ökad förmåga till variation i slutprodukten, till en relativt låg utvecklingsinvestering.

Men för att nå större vinster, och för att höja flera olika aspekter som effektivitet, arbetsmiljö, innovation och minskat klimatavtryck så behöver hela byggsystemet och värdekedjan ses över i relation till digitalisering och robotisering. Robotiseringen skapar nya möjligheter som ifrågasätter etablerad kunskap och erfarenhet kring vad som är dyrt, vad som är svårt och vad som tar lång tid att producera. Genom att se över dessa nya möjligheter i alla skeden från design till färdigt bygge, och från tillverkning av komponenter till sammansatt byggnad så kan de stora vinsterna realiseras.

Den digitalisering som pågår i branschen, med utveckling av digitala standarder och allt mer fokus på digitala modeller som informationsbärare är en förutsättning för robotisering och automation. Dock finns det dåligt med stöd inom de vanligt förekommande programmen som används i branschen för att generera relevant data för robotisering. Här finns det stor potential till utveckling, både med att enkelt skapa robotinstruktioner från BIM-modeller, men också att få tillgång till robotens möjligheter och begränsningar i de digitala miljöer som används i design- och projekteringsskeden.

För att framgångsrikt implementera robotik med stora mervärden så behöver dels befintliga tekniker som använts framgångsrikt i andra branscher utvecklas och sättas samman på nya sätt specifikt för bygg. Dels behöver även ny kompetens byggas upp; kunskap och kompetens behöver finnas i flera led kring styrning och hantering av robotar. Antingen kan denna kompetens inordnas inom befintliga värdekedjor och affärsmodeller eller så tillkommer det nya aktörer som tillgodoser behovet.

Sammanfattningsvis så finns det stora behov inom branschen och en mängd olika tekniker som kan tillämpas för att möta dessa behov. Dock krävs det fortfarande utveckling, framförallt för att sätta ihop olika delar (tekniker och processer) till hela fungerande system. För att få byggande robotar i reell miljö krävs:

- Utvecklad interaktion mellan människa och robot
- Maskinläsbara handlingar och dokument
- Robusta robotar som tål slitage, smuts och väta
- Kunskap och kompetens kring hantering och programmering av robotar inom bygg

För att åstadkomma mervärde vid implementering av robotar bör ett helhettänk appliceras, och tekniken integreras i så stor del av värdekedjan som möjligt. Desto tidigare i design och projektering som roboten kan introduceras desto tydligare kan dess kapacitet utnyttjas för smarta och nya lösningar. För detta krävs ett standardiserat och effektivt digitalt informationsflöde från design till byggd struktur. Digitaliseringen i tillverkningskedet medför en möjlighet till ökad generering av data kring det byggda resultatet och byggprocessen som kan användas för återkoppling och optimering av byggprocessen, men även för byggnadens förvaltningskedje.

# 11. REFERENSER

- AFA Försäkringar. (2019). *Allvarliga arbetsskador och långvarig sjukfrånvaro*. AFA Försäkringar.
- Aitchson, M. (2018). *Prefab Housing and the Future of Building*.
- Anil Sezer, A., & Bröchner, J. (2013). *The construction productivity debate and the measurment of service qualities*.
- Barbosa, F., & et al. (2017). *Reinventing Construction: A Route to Higher Productivity*. McKinsey Global Institute.
- Barbosa, F., Woetzel, J., Mischke, J., João Ribeirinho, M., Sridhar, M., Parsons, M., . . . Brown, S. (2017). *Reinventing Construction: A route to higher productivity*. McKinsey Global Institute.
- Bard, J. e. (2018). Image Classification for Robotic Plastering with Convolutional Neural Networks. *In Proc. ROBARCH 2018, Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design* (pp. 3-15). Zürich: Springer Nature Switzerland.
- Bioservo. (2019, Juni 20). *Bioservo Technologies säljer fem Ironhand®-enheter till Loxam, ett ledande uthyrningsföretag av utrustning och maskiner inom byggnadsindustrin i EU*. Retrieved from Bioservo: <https://www.bioservo.com/sv/pressmeddelanden/bioservo-technologies-saeljer-fem-ironhand-enheter-till-loxam-ett-ledande-uthyrningsfoeretag-av-utrustning-och-maskiner-inom-byggnadsindustrin-i-eu>
- Bock, T., & Linner, T. (2016). *Construction Robots, Elementary Technologies and Single-Task Construction Robots*. New York: Cambridge University Press.
- Boumediene, J., & Grahn, G. (2015). *Produktivitetstutveckling, investeringar och välstånd*. Svensk Näringsliv.
- Boverket. (2018). *2018: 36 Kartläggning av fel, brister och skador inom byggsektorn*. Boverket.
- Boverket. (2018). *Miljöindikatorer*. Boverket.
- Brell-Cokcan, S., & Stumm, S. (2018). Haptic programming. *In Proc. ROBARCH 2018, Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design* (pp. 44-58). Zürich: Springer Nature Switzerland.
- Danish Technological Institute. (2014). *TailorCrete*. Retrieved from <http://www.tailorcrete.com>
- Dubor, A., Izzard, J.-B., Cabay, E., Sollazzo, A., Markopoulou, A., & Rodriguez, M. (2018). On-site robotics for sustainable construction. *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design*, 390-401.
- Ejlertsson, A., Loh Lindholm, C., Green, J., & Ahlm, M. (2018). *Circular ekonomi i byggbranschen*. IVL Svenska Miljöinstitutet.
- Erwin Rauch, D. T. (2015, March). Mobile On-site Factories - scalable and distributed manufacturing systems for the construction industry. *Proceedings of the 2015 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*.
- Guglielmo, C., & Magdani, N. (2016). *Circular Business Models for the Built Environment*.

- Kaltenbrunner, M., & Bencina, R. (2007). *reactIVision: A Computer-Vision Framework for Table-Based Tangible Interaction. Proceedings of the first international conference on "Tangible and Embedded Interaction (TEI07)*. Baton Rouge, Louisiana.
- Kilian, A., & Wu, K. (2018). Designing Natural Wood Log Structures with Stochastic Assembly and Deep Learning. *ROBARCH 2018, Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design* (pp. 16-30). Zurich: Springer Nature.
- Larsson, R., & Jennings, P. (2018). *Digital teknik för att klara byggbranschens utmaningar*. Retrieved from Cementa: <https://www.cementa.se/sv/inspiration/stora-vinster-for-byggbranschen-med-digital-teknik%20>
- Lindemann, H., Gerbers, R., Ibrahim, S., & Dietrich, F. (2018). Development of a Shotcrete 3D-Printing (SC3DP) Technology for Additive Manufacturing of Reinforced Freeform Concrete Structures. *First RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication – Digital Concrete*, 287-298.
- McNeel, Robert & Associates. (2017). Retrieved from <http://www.mcneel.com> (2019-10-21)
- Piskorec, L., Jenny, D., Parascho, S., Mayer, H., Gramazio, F., & Kohler, M. (2018). The Brick Labyrinth. *RobArch2018, Robotic Fabrication in Architecture*, 489-500.
- Soler, V. (2019). *Grasshopper plugin for programming ABB, KUKA, UR and Staubli robots*". Hämtat från <https://github.com/visose/Robots> (2019-10-21)
- Svensk Betong. (2019). *Klimatförbättrad betong*. Svensk Betong.
- Sveriges Byggindustrier. (2017). *Bostadsbyggande - begrepp och kostnadsfördelning*. Sveriges Byggindustrier.
- Åhman, P., & Johansson. (1988). *Robotar i Byggbranschen, möjligheter och användningsområden*. Sverige: FoU-Väst och SBUF rapport nr 08101.

## 12. BILAGOR

Bilaga 1: Enkät till behovsanalys

Bilaga 2: Teknikskanning



# Bilaga 1

## Enkätundersökning – Behovsanalys

Som del att undersöka behoven hos byggföretag i relation till automation och robotisering har en enkätundersökning genomförts inom ramen för projektet *Produktionsautomation i betongbyggandet*.

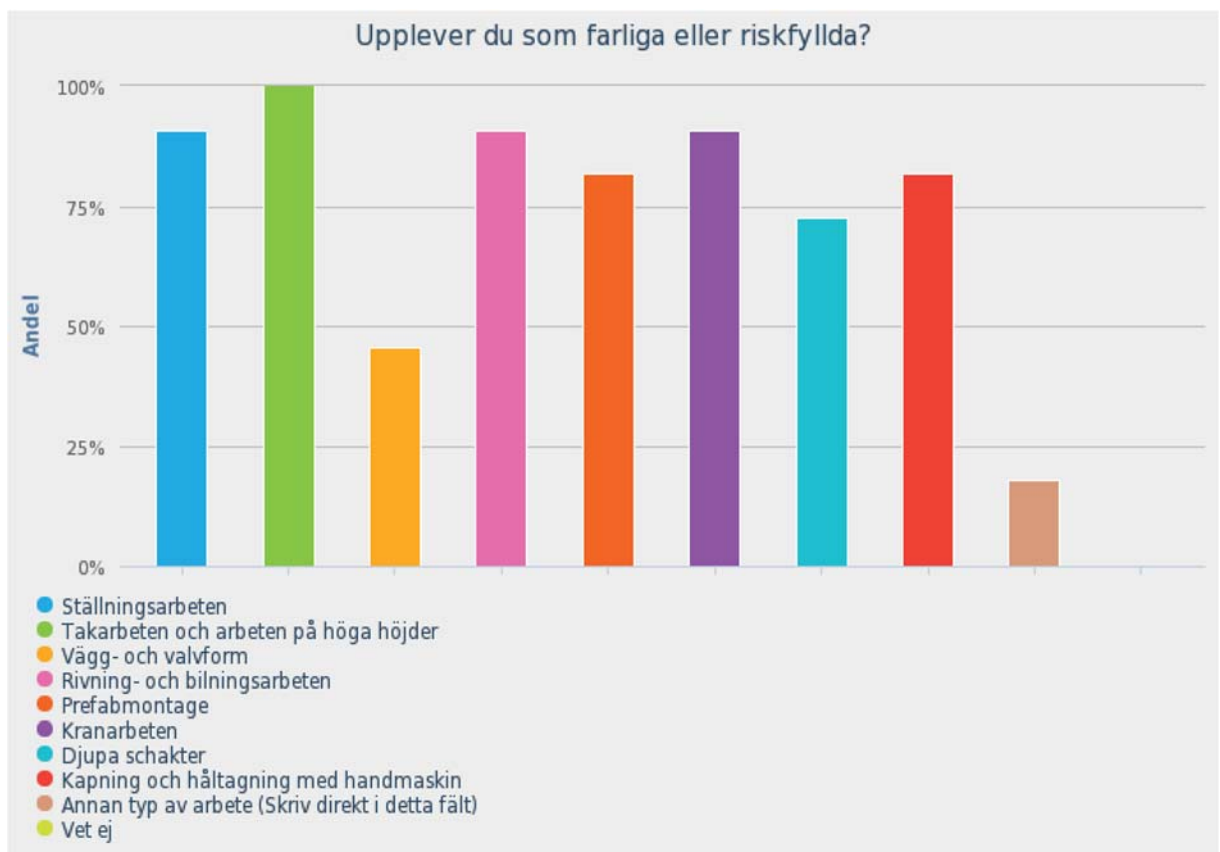
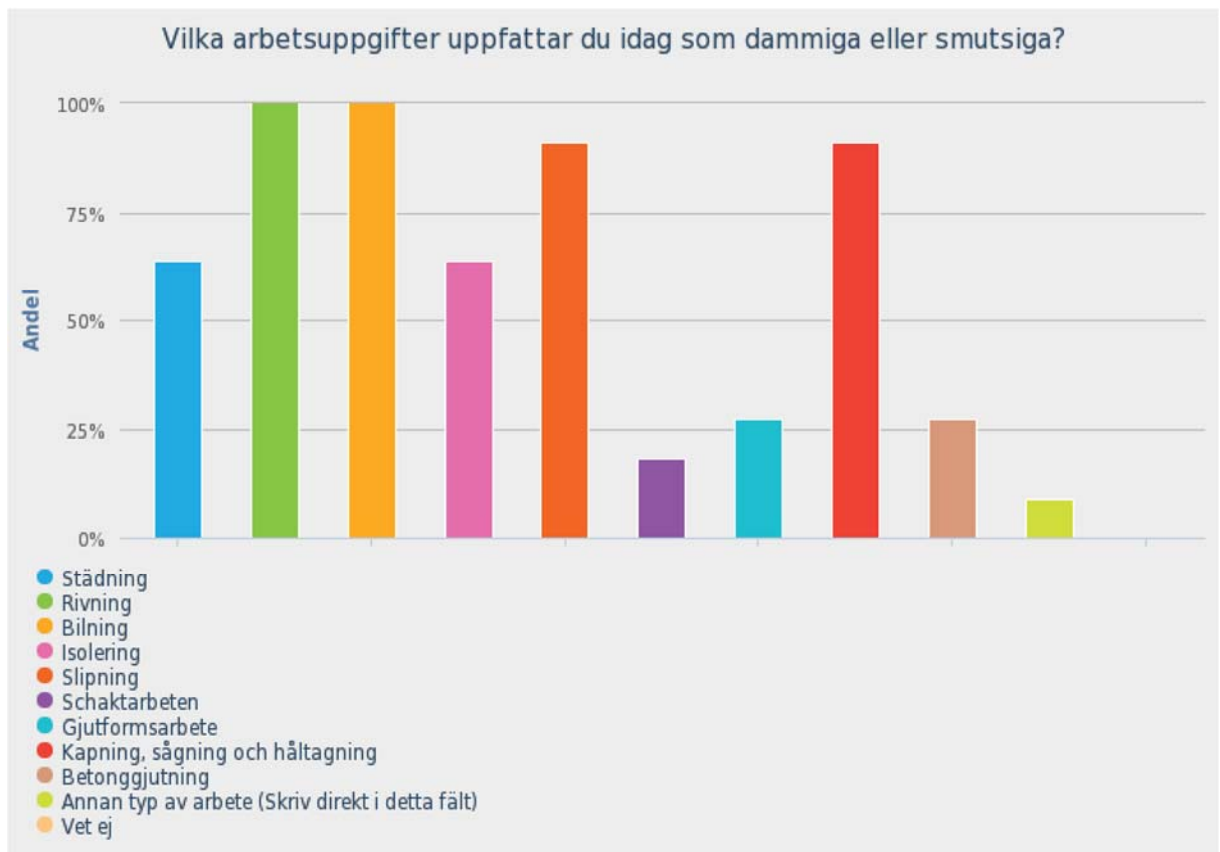
Enkätfrågorna bygger på enkätundersökningen Arbetsuppgifter som produktionspersonal på något sätt vill förändra och förbättra genomförd 1988 av Pär Åhman och som rapporteras i ”Robotar i byggbranschen”.

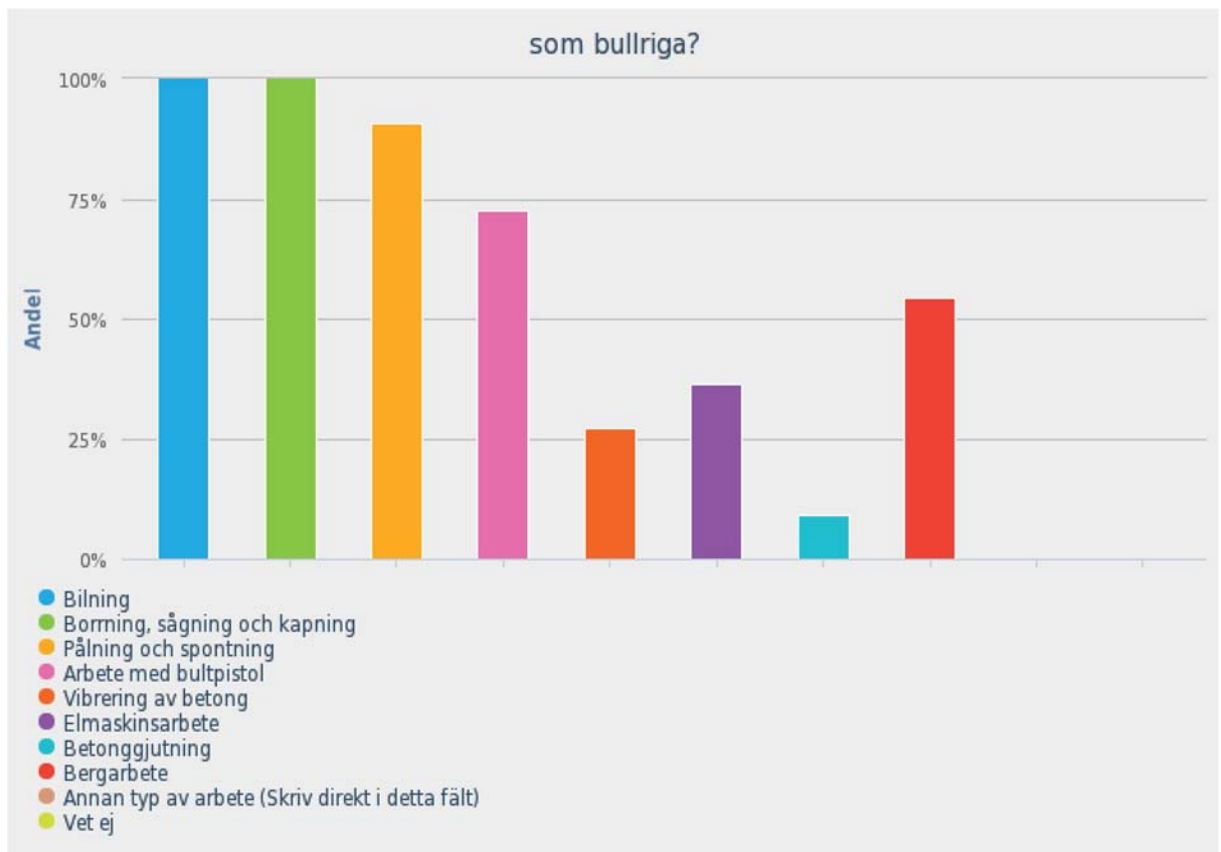
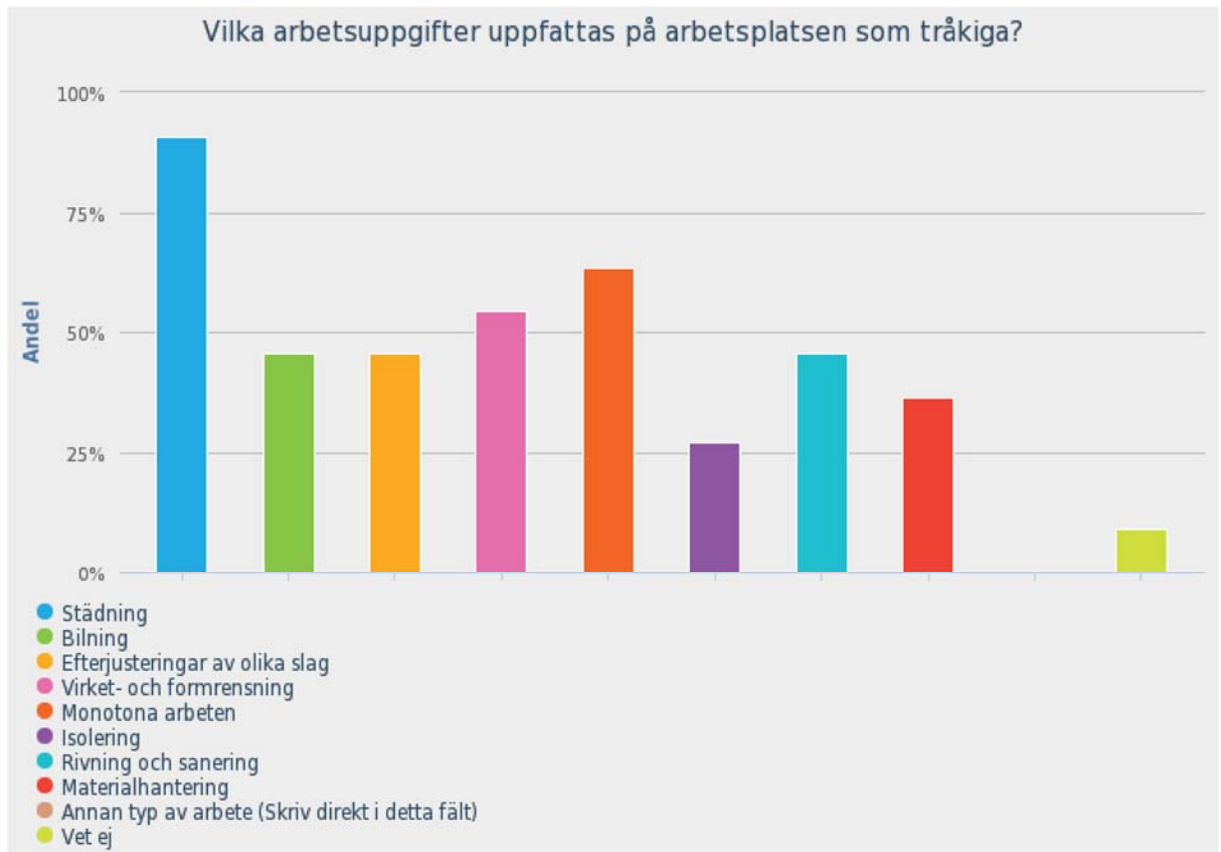
Enkäten svarades på av en expertgrupp bestående av:

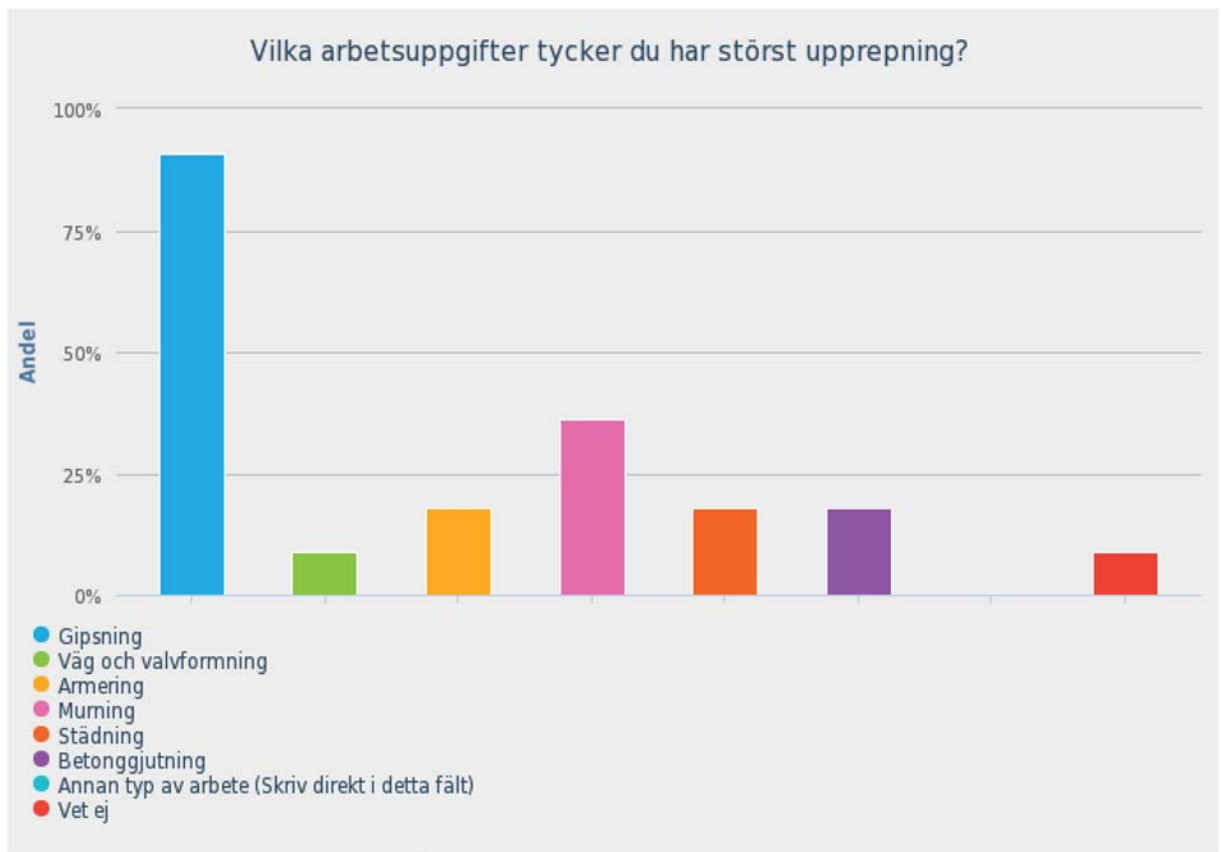
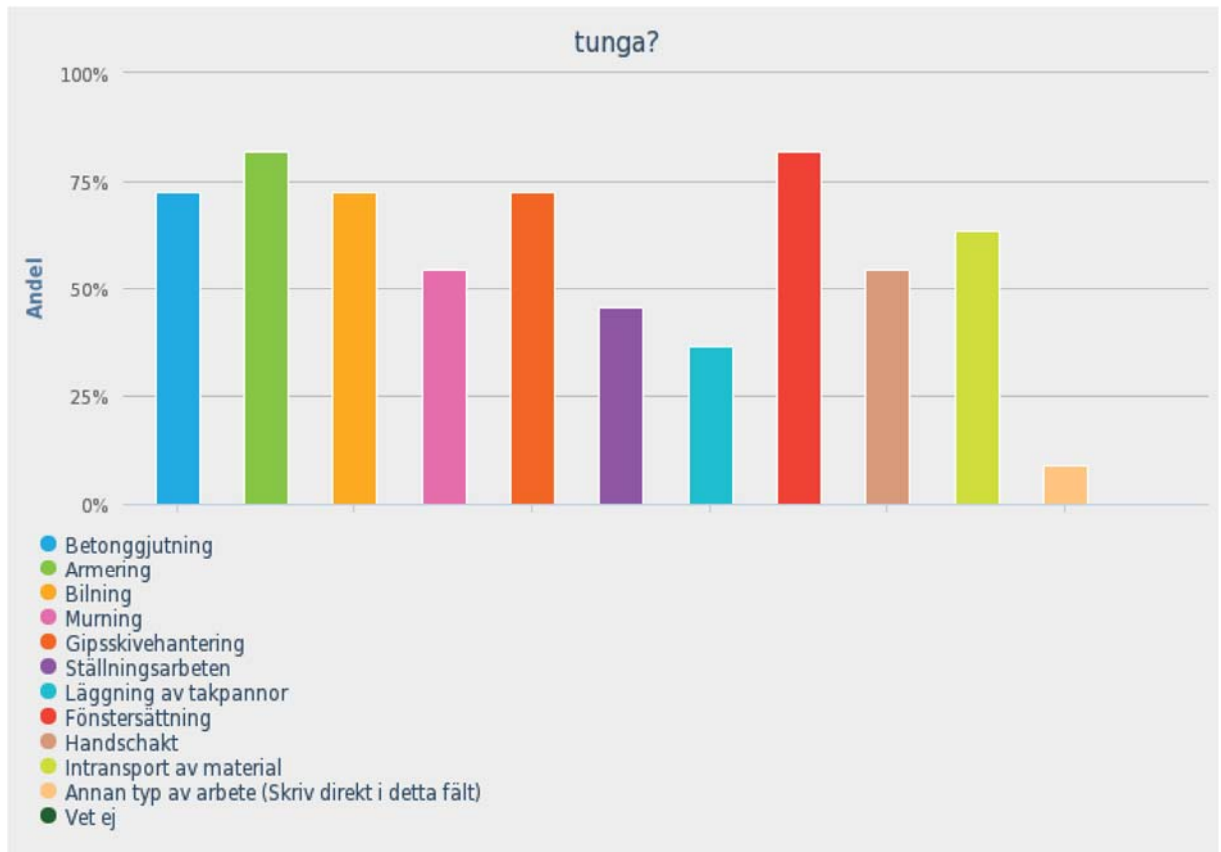
<i>Mats Alhm</i>	Produktionscoach, Peab
<i>Ronny Andersson</i>	Grundare Achoice, FoI-chef CEMENTA, Ordförande Smart Built Environment
<i>David Andréén</i>	Arkitekt SAR/MSA, Universitetslektor Institutionen Arkitektur och Byggd Miljö, LTH
<i>Emil Augustsson</i>	Ansvarig VDC, Veidekke
<i>Mathias Haage</i>	Universitetslektor, Institutionen för Datavetenskap, LTH
<i>Petra Jenning</i>	Arkitekt SAR/MSA, Partner på FOJAB, Ansvarig FOJABcode
<i>Klas Nilsson</i>	VD, Cognibotics samt Docent, Institutionen för Datavetenskap, LTH
<i>Lars Nilsson</i>	Arkitekt SAR/MSA, BAS-P och projektarkitekt, FOJAB
<i>Ola Flink Ohlsson</i>	Bitr. regionchef Bygg Syd samt Produktionscoachchef, Peab
<i>Jim Persson</i>	VDC-ingenjör, Veidekke Sverige
<i>Roger Persson</i>	NCC
<i>Anders Robertsson</i>	Professor, Institutionen för Reglerteknik, LTH
<i>Anders Rosander</i>	Arbetsledare, Veidekke

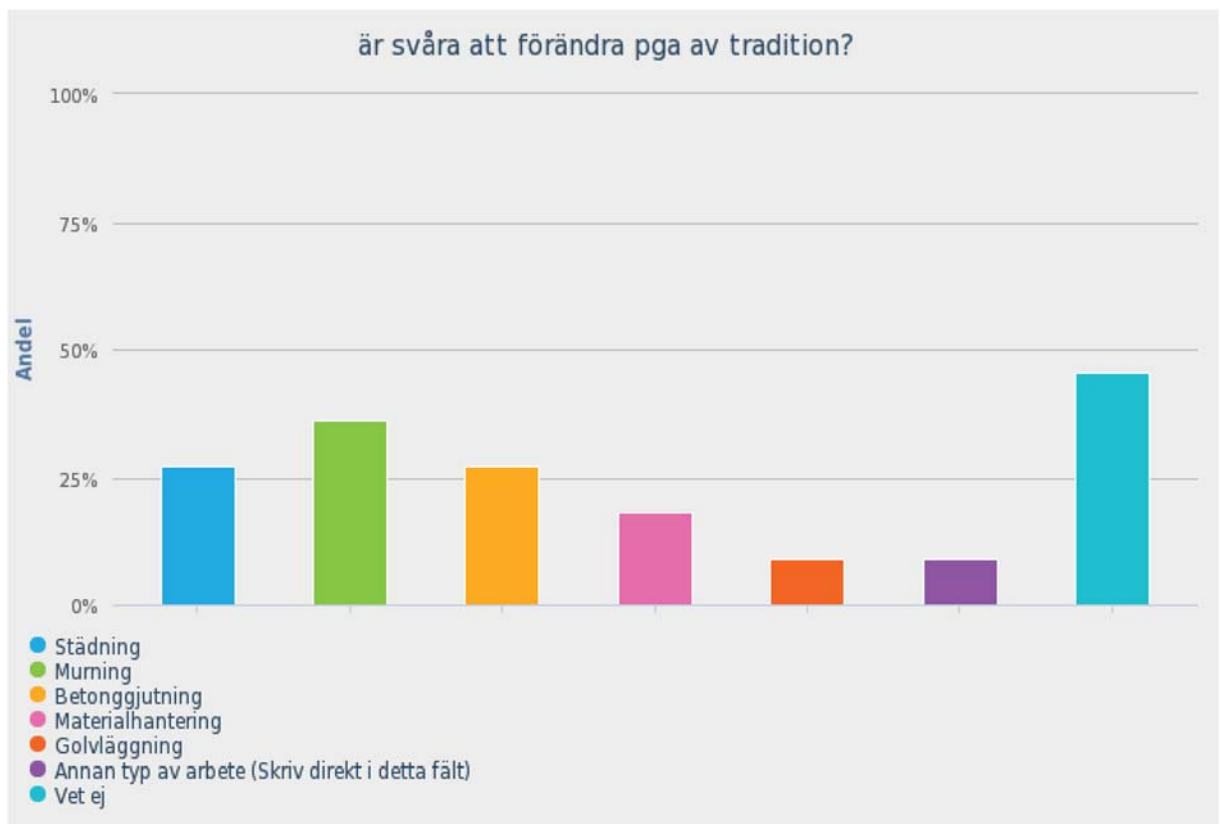
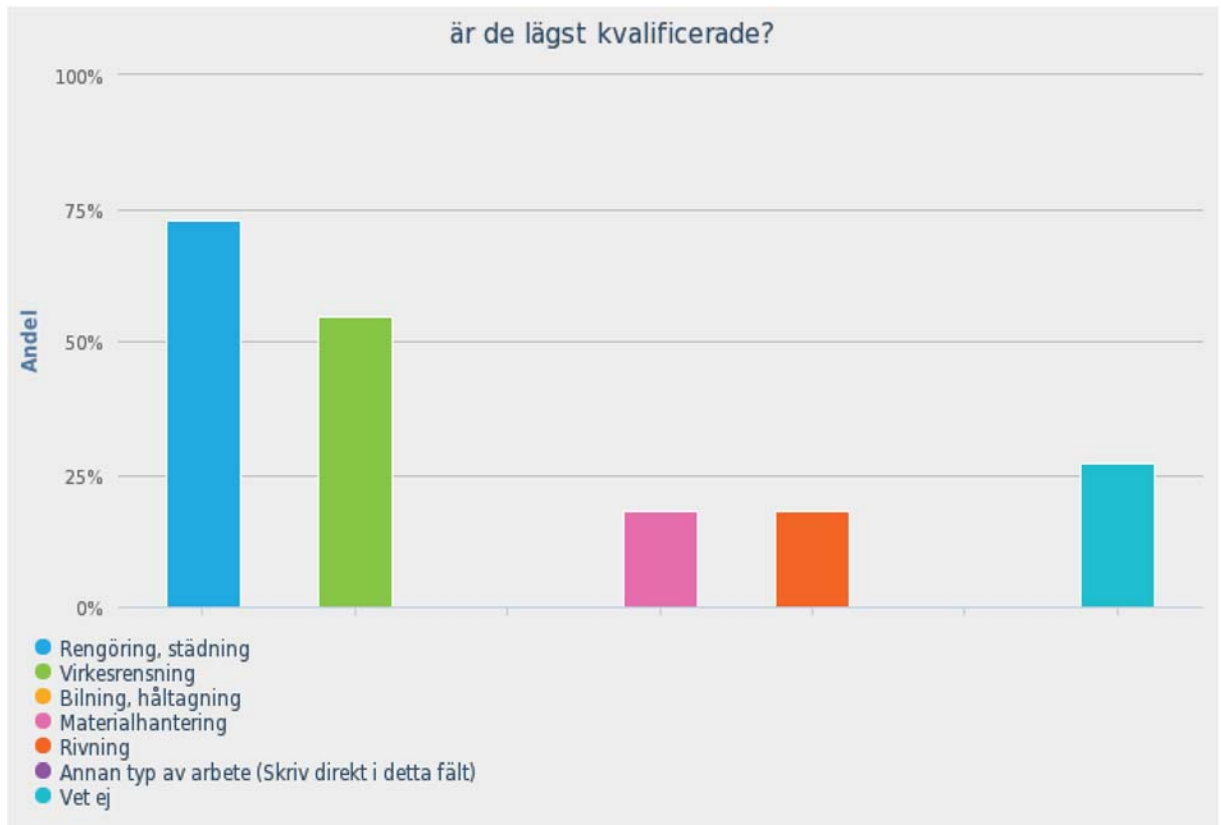
Enkäten följdes upp av en diskussion där gruppen konstaterade att man i enkätundersökningen svarat att samtliga moment var riskfyllda, vilket skilde sig från enkätsvaren 1988, och att detta nog framförallt berodde på att man idag är mycket mer riskmedveten och prioriterar säkerhet.

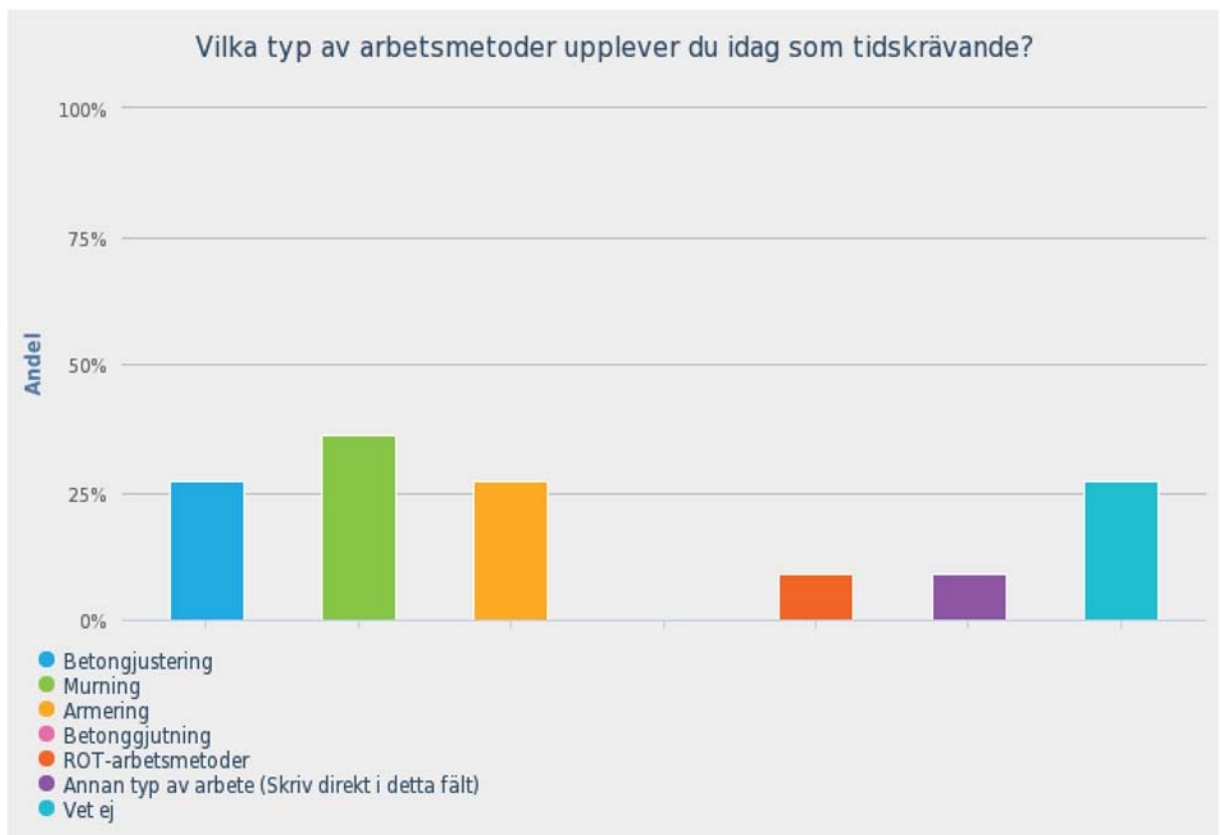
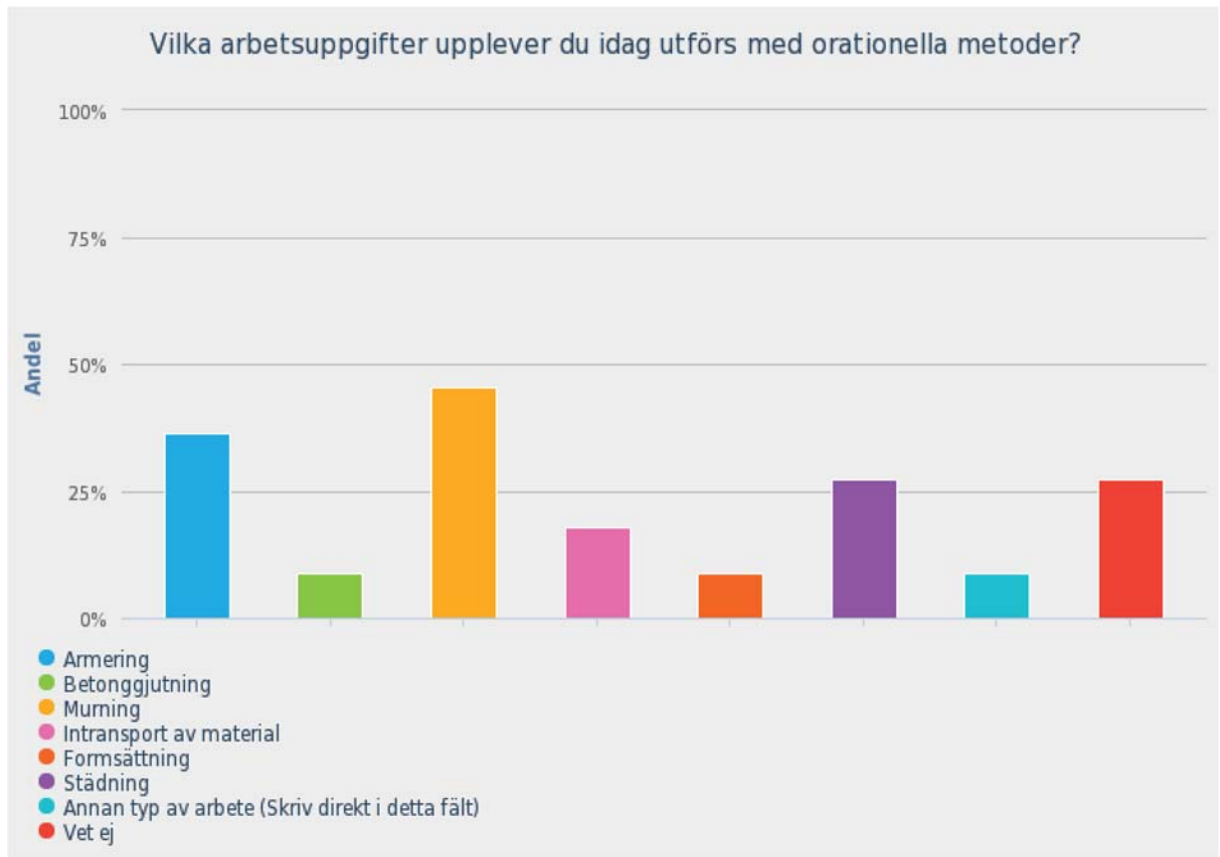
Nedan följer resultatet av enkätundersökningen.

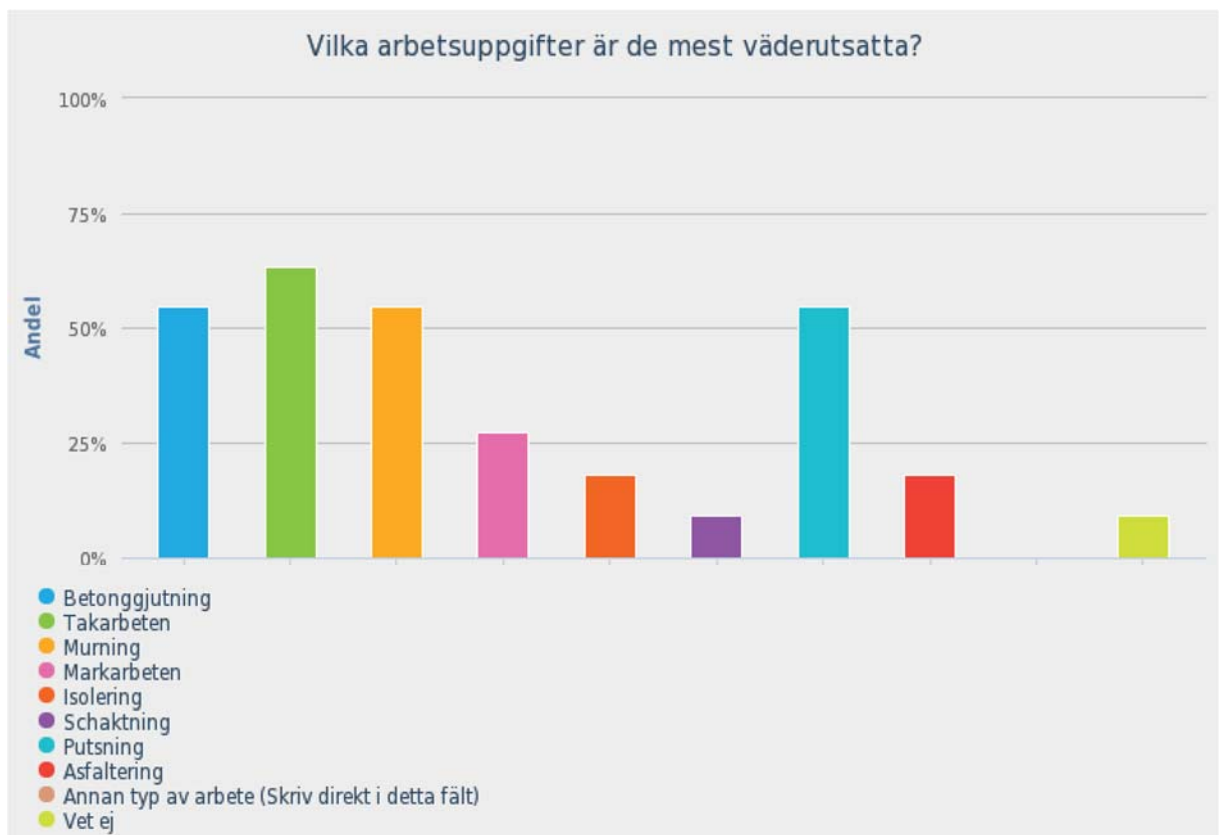
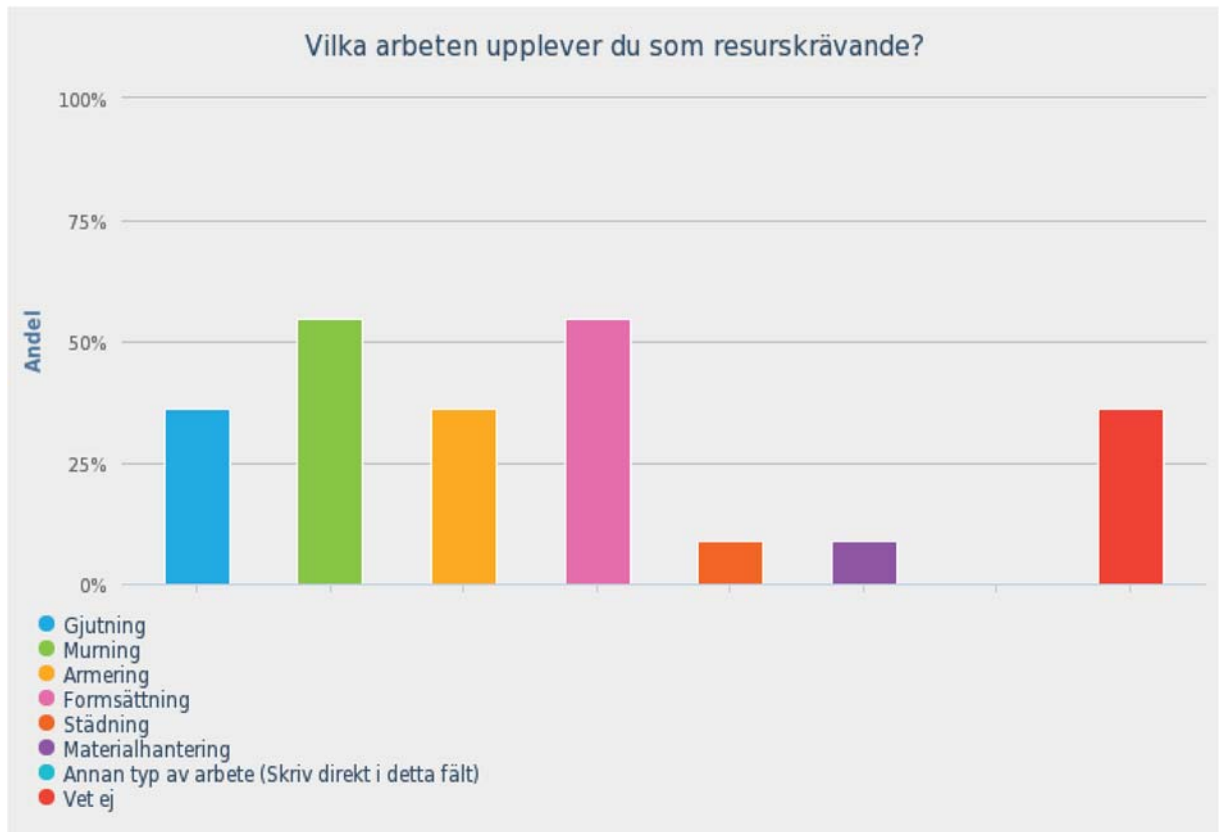












13 Om situationen går att förbättra för ovan av dig nämnda arbetsuppgifter eller metodval - i vilken ordning skulle du önska att förbättringar söktes?

▲	#	Svar	Vikt
	●	Betonggjutning	5,4
	●	Takarbeten	4
	●	Armeringsarbeten	4,3
	●	Murning	3,6
	●	Betongbearbetning	2,7
	●	vet ej	1,5