

CONSTRUCTION FACTORY

Proof of Concept



Martin Blohm

2022-11-04

Förord

Tack till alla involverade som bidragit med kunskap och engagemang i projektet. Det goda samarbetet mellan Skanska, Volvo, RISE, Mälardalens högskola och Trafikverket har resulterat i intressanta resultat i ett väl genomfört projekt. Ett speciellt tack till SBUF som bidragit till finansiering av Skanskas del av projektet, och som med sin verksamhet bidrar till att den svenska bygg- och anläggningsbranschen utvecklas! Ett speciellt tack förtjänar också Vinnova som genom sitt bidrag möjliggjort projektet som helhet.

Tack också till representanter från NCC och PEAB som bidragit med sin tid och gett värdefull input via referensgruppen.

Projektgrupp Skanska:

Martin Blohm, Specialist Maskinteknik - Skanska Teknik

Roger Nilsson, Specialist VTC - Skanska Teknik

Referensgrupp:

Linus Persson - NCC

Anders Gudmarsson - PEAB

Per-Ola Jönsson, Avd-chef OPEX - Skanska Industrial Solutions AB

Henrik Sjöholm, Specialist asfalt OPEX - Skanska Industrial Solutions AB

Styrgrupp:

Joakim Jeppsson, FoU-chef - Skanska Teknik

Helena Burstrand-Knutsson, Avd-chef VTC - Skanska Teknik

Henrik Hassler, Utvecklingschef VU – Skanska Industrial Solutions

Per-Ola Jönsson, Avd-chef OPEX - Skanska Industrial Solutions AB

Henrik Sjöholm, Specialist asfalt OPEX - Skanska Industrial Solutions AB

Huvudförfattare rapport: Martin Blohm

Göteborg, Augusti 2022

SAMMANFATTNING

Denna rapport är en summering av projektet ur Skanskas perspektiv. För fullständig redovisning av projektets genomförande och resultat hänvisas till Vinnova-rapporten ”Construction Factory Proof of Concept Slutrapport 2021-12-29” Bilaga 1.

Projektet *Construction Factory Proof of Concept* är ett samarbete mellan Skanska, Volvo Construction Equipment, RISE, Mälardalens högskola och Trafikverket med finansiering från Vinnova, SBUF och parterna. Denna rapport sammanfattar arbetet och uppnådda resultat i projektet i allmänhet, och Skanskas delar av projektet i synnerhet. Projektet genomfördes 2018-2021.

Projektets syfte har varit att genom tillämpning av industriella principer och metoder förbättra produktivitet och kvalitet samt minska klimatpåverkan i anläggningsproduktion. Detta uppnås genom att koppla upp enheter, mäta olika parametrar och samla in digital information som sedan kan användas för att styra och följa upp verksamheten. För att möjliggöra detta behöver informationsutbytet mellan de olika delsystemen standardiseras och helheten samlas i ett ”system-of-systems”. Genom att mäta och ha full överblick på processen kan den också effektiviseras. Inspiration har hämtats från tillverkningsindustrin med koncept som Lean production och Industri 4.0, men har anpassats till anläggningsbranschens speciella förutsättningar där produktionen hela tiden förändras och flera olika aktörer samarbetar. På anläggningsmarknaden utgörs dessutom slutkunderna av ett fåtal stora aktörer såsom kommuner och Trafikverket, vilket gör att även dessa spelar en viktig roll och kan i olika grad integreras i det digitala ekosystemet. Effektivisering ger inte bara reducerade kostnader, utan går också hand i hand med minskad miljöpåverkan, eftersom energi (till stor del fossila bränslen) utgör en betydande del i kalkylen.

Projektet *Construction Factory* är tänkt att industrialisera hela produktionsförloppet från loss hållning av berg till färdig asfaltbeläggning. I detta steg av projektet, *Proof of Concept*, har den sista delen av kedjan valts ut, asfaltutläggning, för att demonstrera idén med konceptet *Construction Factory*. Asfaltutläggning är en process som är beroende av timing och samspel mellan många olika aktörer för att få ett effektivt och kvalitativt utförande, och lämpar sig därmed väl för *Proof of Concept* då man snabbt och tydligt kan påvisa resultat och nytta med industrialiseringen.

I projektet har en fullskalig demonstration genomförts där anläggningar, maskiner och fordon involverade i asfaltutläggning försetts med utrustning för att övervaka flertalet viktiga parametrar såsom mängder, temperaturer, tid, plats med mera. Denna information har i realtid samlats in av ett samordnade molnsystem (system-of-systems) som hanterat och analyserat datan för att sedan vidarebefordra relevant information till respektive aktör.

Det kan konstateras att asfaltutläggning är en dynamisk process. Framförhållningen är kort för när arbetet kan påbörjas och påverkas av såväl tidigare förarbeten som av väderförhållanden. Det är således en utmaning att tillämpa industrialiseringens styrda metodik fullt ut där allt ska samverka med en minutiös timing. Dock visade demonstrationen ändå snabbt resultat på att genom att dela relevant information, agerar aktörer senare i kedjan preventivt för att minimera konsekvenser av störningar tidigare i kedjan.

Datan som samlas in är också till nytta för att långsiktigt förbättra processen. Genom att analysera och kombinera den loggade datan kan åtgärder vidtas bland annat för att effektivisera energiåtgång, maskinutnyttjande och transporter men också för att minimera risken för kvalitetsvariationer på material och resultat. Genom att göra processen fullt spårbar och dokumenterad kan kvalitén verifieras på ett tydligare sätt. Detta öppnar upp för andra typer av upphandlingar i framtiden som att slutkunden istället för utförandekrav ställer funktionskrav på färdig väg där det är upp till entreprenören att välja metod och verifiera kvalitén. Detta främjar också utvecklingen inom entreprenadbranschen där aktörerna har större möjligheter att utveckla nya metoder, material och arbetssätt.

INNEHÅLL

1. INLEDNING	5
1.1 BAKGRUND	5
1.2 SYFTE OCH MÅL	5
2. GENOMFÖRANDE	6
2.1 STRUKTUR	6
2.2 AP1 ANVÄNDNINGSFALL OCH PROCESSER	6
2.3 AP2 ANVÄNDARGRÄNSSNITT	7
2.4 AP3 PLANERING OCH OPTIMERING.....	7
2.5 AP4 TEKNIKPLATTFORM	7
2.6 AP5 DEMONSTRATION.....	7
2.7 AP6 EFFEKTVALIDERING.....	8
3. RESULTAT OCH SLUTSATSER	9
3.1 DIGITALISERINGSPOTENTIAL.....	9
3.2 INFORMATION I REALTID.....	9
3.3 DIGITALT INFORMATIONSUTBYTE.....	10
3.4 SAMVERKAN MELLAN MASKINER	10
3.5 ÖKAD KONTROLL PÅ PROCESSEN	11
3.6 LÅNGSIKTIGA FÖRBÄTTRINGAR.....	11
3.7 REAKTIONER FRÅN INVOLVERADE AKTÖRER	12
4. NÄSTA STEG	13
BILAGA 1	14
VINNOVA SLUTRAPPORT CONSTRUCTION FACTORY PROOF OF CONCEPT VER 2021-12-29	14

1. INLEDNING

1.1 Bakgrund

Produktiviteten i bygg- och anläggningsindustrin har inte ökat i samma grad som i tillverkningsindustrin (McKinsey & Co 2017). En bidragande orsak är att anläggningsprojekt är komplexa och kan inte göras repeterbara i samma utsträckning som serietillverkning på fabrik. Dock finns det mycket teknik, metoder och erfarenheter från tillverkningsindustrin som skulle kunna tillämpas även på anläggningsprojekt, men som inte görs idag. Ett sådant område är att samla in digital information och använda denna för att styra produktionen. Genom att koppla upp och mäta flertalet parametrar i processen erhålls kontroll över vad som sker och det ges möjlighet att agera i realtid för att optimera flödet, men också att analysera efteråt vad som kan göras bättre nästa gång. På så sätt kan både effektivitet och kvalitet höjas. Reducerade kostnader går också hand i hand med minskad miljöpåverkan, eftersom energi (till stor del fossila bränslen) är en stor del av kalkylen. Forskning har visat att byggnation och underhåll av vägar i Sverige står för 2,5–3 miljoner ton koldioxid per år, vilket motsvarar 15% av utsläppen för inrikes transporter (KTH 2012).

Anläggningssektorn är i högsta grad mekaniserad och maskintillverkare har under lång tid fokuserat på att optimera sina maskiner för maximal produktivitet, på senare tid också med fokus på ökad grad av automation och elektrifiering. Dock står det alltmer klart att många frågor måste lösas på en högre nivå, med målet att optimera det övergripande flödet i produktionen mot kvalitet, produktivitet, resursutnyttjande, ledtider och minskad miljöpåverkan. I detta är informationshantering och utbyte av data en grundsten, vilket också uppmärksammas i Trafikverkets vision om det "smarta projektet" (Trafikverket 2012).

Att göra rätt från början ligger i allas intresse och är en vinst ur alla perspektiv: tid, kvalitet, kostnad och miljö.

1.2 Syfte och mål

Projektet *Construction Factory* har syftet att med hjälp av strategier och metoder från tillverkningsindustrin få ett mer industrialiserat produktionsförlopp från losshållning av berg till färdig asfaltbeläggning. I denna del av projektet, *Proof of Concept*, har fokus varit att genomföra en demonstration under verkliga förhållanden med uppkopplade maskiner och samla in relevanta data att agera på i realtid såväl som att kunna följa upp efteråt. Målet är att påvisa möjligheten att uppnå en högre effektivitet, högre kvalitet och ett minskat resursutnyttjande genom att ha kontroll över hela processen.

2. GENOMFÖRANDE

2.1 Struktur

Vinnovaprojektet som detta SBUF-projekt varit en del av har genomförts i sex olika arbetspaket (AP).

AP1: Användningsfall och processer

AP2: Användargränsnitt

AP3: Planering och optimering

AP4: Teknikplattform

AP5: Demonstration

AP6: Effektvalidering

Varje arbetspaket har haft en projektledare som lett en projektgrupp med deltagare från de olika parterna. Skanska insatser har främst handlat om att beskriva hur processerna går till och vilka resurser som används, samt att tillhandahålla lämpliga projekt där fullskaliga demonstrationer av konceptet kan genomföras under verkliga förhållanden.

2.2 AP1 Användningsfall och processer

Projektet inleddes med att kartlägga processen från bergtäkt till färdiglagd väg för att förstå vilka olika moment som utförs och hur de inverkar på varandra i produktionskedjan. Därmed går det också sortera ut vilken information som är viktig att samla in och vad som är viktigt att förmedla till respektive aktör. Under projektets gång beslutades att förlägga den fysiska demonstrationen till de sista stegen i kedjan - asfalttillverkning och utläggning. Asfaltmassan är en färskvara och det krävs timing och ett kontinuerligt informationsutbyte mellan de olika aktörerna för att få en färdig asfaltbeläggning med rätt kvalitet. Därmed lämpar sig dessa steg väl för att påvisa värdet av informationsutbyte och möjligheten att agera på händelser tidigare i kedjan. Extra vikt har därför lagts vid att kartlägga processen och även identifiera olika användningsfall i flödet från asfalttillverkning till färdiglagd beläggning.

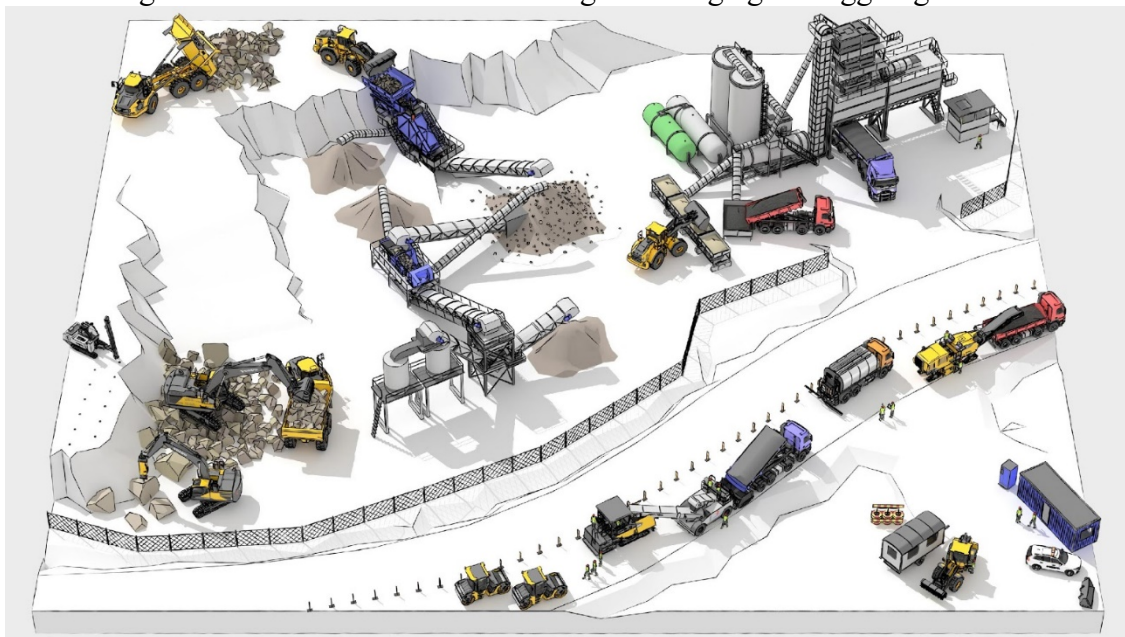


Bild 2.2.1 From rock to road – från bergtäkt till färdiglagd väg

2.3 AP2 Användargränssnitt

I processer och användargränssnitt från AP1 har de olika aktörerna och dess arbetsmoment identifierats för att förstå vilken deras roll är och vilka beslut de kan fatta. Besluten fattas baserat på information, och här har stor vikt lagts vid att presentera rätt information, i rätt tid och i rätt format för att få ett användarvänligt och felsäkert gränssnitt.

2.4 AP3 Planering och optimering

Informationen från processerna har använts för att styra resurser och schemalägga olika delmoment för att få en kontinuerlig produktion. Detta har tillämpats på både leveranser av asfalt (asfaltverk, lastbilar) och på själva asfaltutläggningen (läggare, vält).

2.5 AP4 Teknikplattform

En teknikplattform har utvecklats av RISE för att kunna ta emot och hantera digital information från de ingående anläggningarna, fordonen och maskinerna. Ett informationsgränssnitt baserat på Industri 4.0 har tillämpats, och med hjälp av teknikplattformen kan de olika delsystemen kommunicera med varandra och man uppnår ett ”system-of-systems”. Detta har använts för att utföra simuleringar av olika händelseförlopp såväl som att hantera data från de fysiska demonstrationerna.

2.6 AP5 Demonstration

Två omfattande demonstrationer har genomförts i samband med verkliga asfaltutläggningsprojekt i trakterna runt Stockholm. Det ena var asfaltering av större öppna ytor utanför en industrilokal i Bålsta, och det andra var omasfaltering av E18 vid Täby. Bålsta valdes ut som första utförandeobjekt då lokaliseringen på en större industriplan dagtid utan förbipasserande trafik, gjorde objektet lämpligt för att trimma in den utrustning som maskinerna försetts med. Asfalteringen på E18 Täby genomfördes nattetid i ett relativt kort och definierat tidspann då trafiken på den del som skall asfalteras stängdes av, vilket gjorde maskinerna behövde vara i drift så mycket som möjligt under arbetspasset. Utrymmet på vägen är dessutom begränsat och riskerna med förbipasserande trafik förekom också. Sammantaget gjorde detta att på E18 behövde utrustningen redan vara intrimmad och i funktion utan några större behov av service. Totalt inhämtades information från många olika parametrar från ett stort antal maskiner under flera veckors arbete, vilket förutom det direkta informationsutbytet också gav en stor mängd loggad data att bearbeta och analysera i efterhand.



Bild 2.6.1 Demonstration nattetid E18 Täby

2.7 AP6 Effektvalidering

I det avslutande projektsteget analyserades den insamlade datan för att jämföra och dra slutsatser hur processens olika steg genomförts. Effektivitet kan mätas genom att analysera bland annat tider för transporter, maskinutnyttjande och vilka olika typer av störningar som uppkommit och hur de har hanterats och påverkat flödet. Kvalitet kan mätas genom att under hela processen ha kontroll på asfaltmassans temperatur, men även väntetider och samspel mellan läggare och vält är av betydelse.

3. RESULTAT OCH SLUTSATSER

3.1 Digitaliseringspotential

Det kan konstateras att det finns stor potential att öka digitaliseringen av produktionssidan vid anläggningsarbeten. Digitala arbetssätt är relativt väl implementerat i projektering och underlag levereras ofta digitalt till produktionen. I produktionen används dock digitaliserade arbetssätt i mindre omfattning och här finns en stor vinst om det digitala underlaget kunde användas direkt utan manuell anpassning för inmatning i olika system. Vidare finns det stor potential i att koppla upp, mäta och samla in data från processernas ingående anläggningar, fordon, maskiner och material. Idag utbyts information ofta genom direktkontakt mellan de olika aktörerna, inte sällan med telefonsamtal, och det finns ingen tydlig struktur för hur informationsflödena behöver se ut. Genom att koppla upp hela kedjan, kan informationsflödet styras så att rätt information når rätt mottagare i rätt tid. För detta krävs ett system-of-systems med en gemensam standard för att utbyta digital information mellan kedjans olika planeringsverktyg, anläggningar, maskintyper, fordon med mera. Detta är grundläggande för att kunna se helheten och möjliggöra en industrialisering av processen.

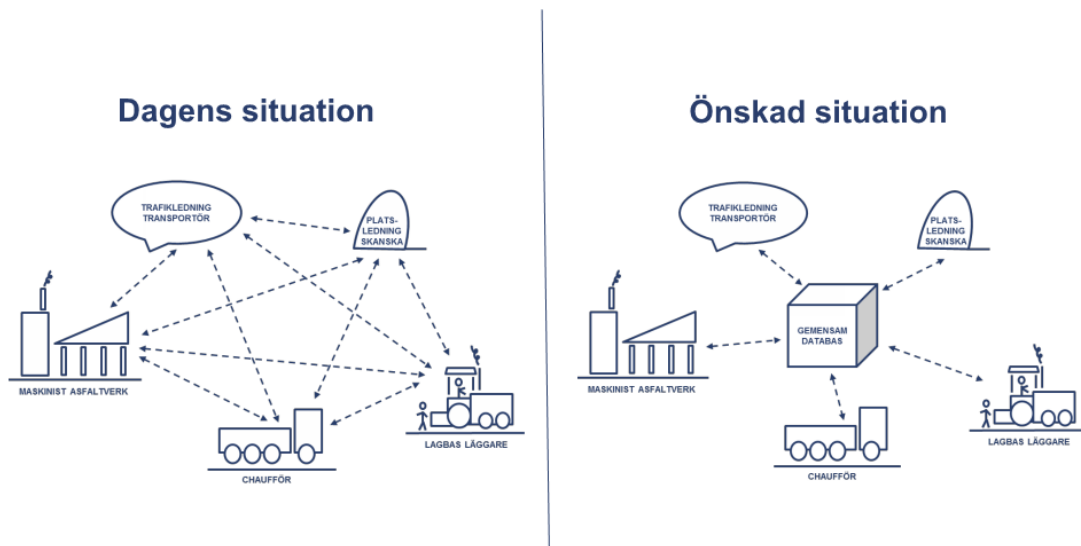


Bild 3.1.1 Informationsutbyte idag och i framtiden

3.2 Information i realtid

Den direkta påverkan av att i realtid få information om de föregående stegen i kedjan, kunde under demonstrationerna tydligt påvisas. En effekt som kunde iakttas nästan omedelbart var hur personalen anpassade utläggningen av asfalten baserat på ETA (estimated time of arrival) för nästa bil med asfaltmassa. ETA visades direkt i läggarens display, och vid något tillfälle väntade läggarlaget med att påbörja nästa "drag" av asfaltutläggning, trots att det redan stod en lastbil redo att lossa. Teknikerna på plats trodde att det var tekniska problem och skyndade fram för att höra sig för om vad som var problemet. "Inga problem" blev svaret från läggarlaget, "men nästa lastbil är för långt bort så påbörjas nästa drag nu så kan vi behöva lägga en skarv då den här bilens asfaltmassa kommer att ta slut innan nästa bil är här". Detta är ett tydligt exempel på hur en, med dagens teknik, relativt enkel funktion kan utgöra väsentliga förbättringar i produktionen.

Läggjarlaget kunde undvika att lägga en skarv vilket inte bara besparade dem merarbete, utan det gav också ett bättre slutresultat på beläggningen då denna kunde läggas utan tvärgående skarvar. Vice versa talade systemet om för chaufförerna huruvida läggjarlaget väntade på deras lass eller om det redan var kö med lastbilar vid utläggningen. Baserat på detta kunde chauffören anpassa sin körning, matraster med mera, men också se till att parkera lite längre bort för att undvika trängsel på utläggningsplatsen. Detta var extra värdefullt på E18 där det var ont om plats och den här typen av tidspressade utläggningsjobb är dessutom ofta planerade med lite för många bilar för att säkert undvika att materialet tar slut vid något tillfälle. Därmed var det oftast en viss kö innan det går att köra fram och lossa till läggaren.

3.3 Digitalt informationsutbyte

En annan direkt effekt av de uppkopplade systemen var att det går att överföra information digitalt och per automatik mellan fordon och maskiner. När massan tippas i läggaren överförs information om fordon, massatyp och vikt automatiskt och operatören behöver bara bekräfta att uppgifterna är korrekta. Förutom att det är säkrare och underlättar för personalen att slippa gå fram till lastbilen och ta emot papper med uppgifter som skall matas in manuellt, är detta system också mer felsäkert genom att inmatningsfel undviks och det är ingen risk att till exempel en vågsedel försvinner eftersom informationen finns lagrad i en molntjänst.

3.4 Samverkan mellan maskiner

Gällande utläggningen finns det en samverkan mellan läggaren som lägger ut asfalten i ett jämnt flöde och välten som kompakterar beläggningen efteråt. Det finns en optimal temperatur på asfaltmassan för att den ska kompakteras på rätt sätt utan sprickor eller hålrum, och det finns också ett optimalt antal överfarter välten skall göra. Genom att förse läggare och vält med värmekameror kan temperaturen på beläggningen hela tiden övervakas och ge vältföraren information i realtid om temperatur och antalet överfarter på det vägavsnitt som just nu kompakteras, vilket underlättar för vältföraren att uppnå en hög och jämn kvalitet. Vältens rörelsemönster i förhållande till läggaren är relativt styrt, och ska man tänka ytterligare ett steg skulle vältningen kunna göras helt eller delvis autonom. En vältförare skulle då mer få rollen av processoperatör som övervakar en eller flera vältar och kan vid behov gå in och justera eller styra vältarnas framfart.

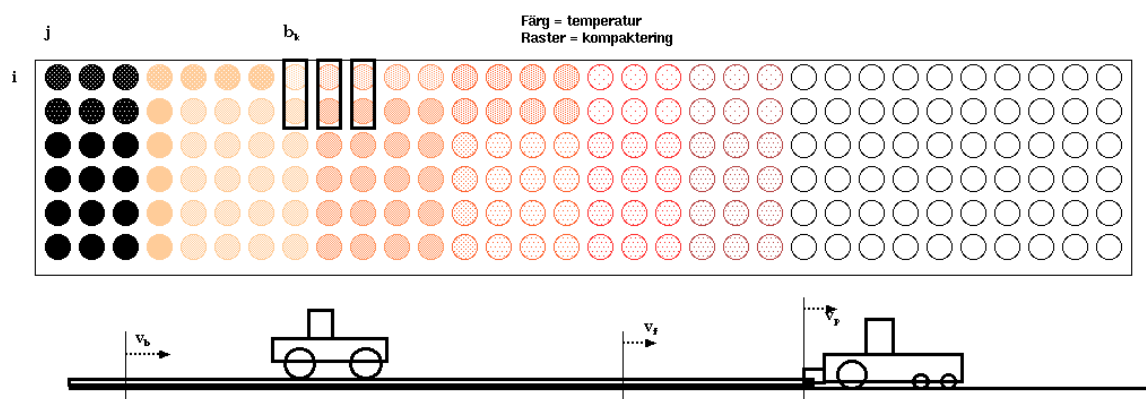


Bild 3.4.1 Temperatur och kompaktering

3.5 Ökad kontroll på processen

Om man ser till processen som helhet finns det ett stort värde för ledningen att kunna övervaka förloppet i realtid, vilket bekräftades av entusiasmen hos ledningen för demonstrationsobjekten. Framdriften kan kontinuerligt stämmas av mot tidplanen och eventuella störningar förutses och pareras. Det går också att gå in på enskilda enheter och till exempel se fordonens position och drifttid, men också parametrar som temperaturer och materialåtgång kan stämmas av mot förväntade värden och vid behov ageras på i ett tidigt skede. Genom att relevant data loggas kan sedan rapporter med önskad information tas ut från systemet och distribueras till slutkund som verifikat på att utlagd asfalt uppfyller kvalitetskraven. Just dokumentationen är idag ett tidsödande arbete som sammanställs i efterhand med pappersvägsedlar och information från olika källor. Genom att kontinuerligt mäta, styra och dokumentera de parametrar som påverkar kvaliteten på beläggningen uppnås en repeterbarhet som säkerställer en hög och jämn kvalitet, vilket i förlängningen också kan minska behovet av att efteråt göra kvalitetskontroller som till exempel provborring eller scanning med georadar.

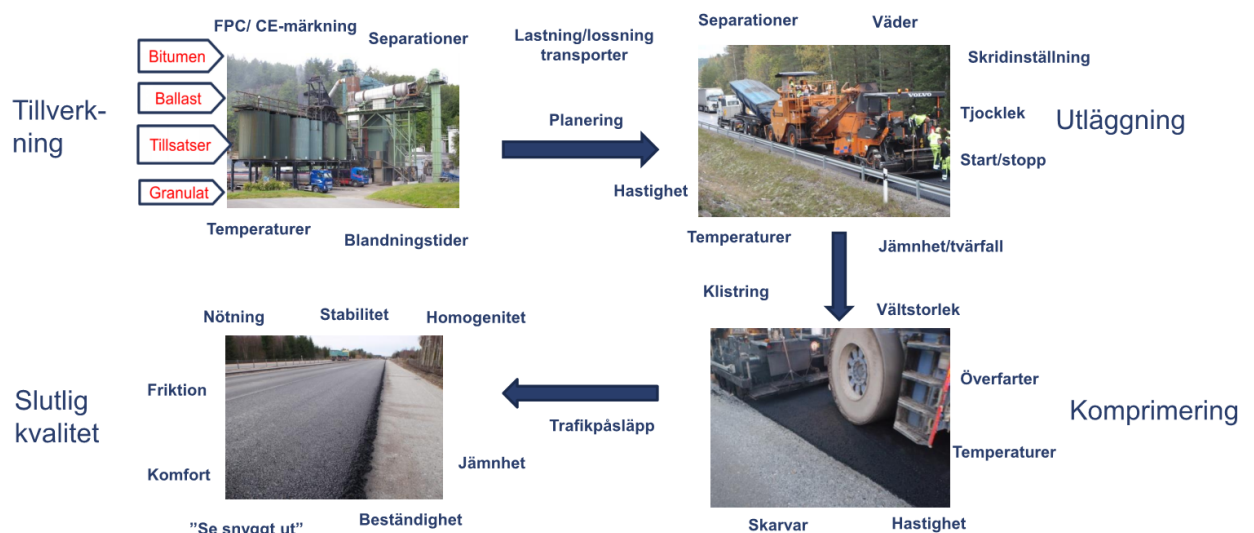


Bild 3.5.1 Processen som helhet

3.6 Långsiktiga förbättringar

Andra fördelar ur ett längre perspektiv är att all data som samlas in utgör en värdefull källa för att kontinuerligt förbättra processer och resultat. Orsak och samband kan lättare identifieras och parametrar som berör maskinutnyttjande, tillverkning och transporter kan analyseras för att förebygga störningar och använda resurserna effektivare. Genom att studera genomsnittlig cykeltid för lossning-lastning-lossning hos en lastbil blir det enklare att förutspå behov av antal bilar på objekt med liknande förhållanden. Det blir lättare att förstå vad som ger kvalitetsvariationer och orsaken till dessa kan elimineras. Genom att förstå påverkan av yttre faktorer som väder och temperatur samt andra förutsättningar som till exempel antalet brunnar, erhålls en träffsäkrare tid- och resursplanering som också tar hänsyn till årstid och objekt. Med tiden byggs det upp en erfarenhetsbank som gör det enklare att förutspå hela förloppet oavsett objekt, vilket i förlängningen ger förutsättningar för att ta nästa steg i utvecklingen – att göra utläggningen helt eller delvis autonom. Erfarenheter från utvecklingen av självkörande bilar visar att detta är ett komplext område och det tar längre tid än förväntat att uppnå full autonomi,

men som alltid kan man börja med de lågt hängande frukterna, och där kan som tidigare nämnts välten vara ett tänkbart objekt att börja med.

3.7 Reaktionen från involverade aktörer

Projektgruppen har fått mycket feedback och reaktioner från de tänkta användarna av systemen. Vältföraren var erfaren och hade körmonster med antal överfarter etcetera i ryggmärgen, men tyckte ändå att kartan över aktuellt område gav ett visst mervärde. En oerfaren vältförare hade förmodligen funnit mer stöd av systemet. Läggarlaget började omgående anpassa sitt arbete efter ETA och såg ett stort värde av detta, såväl som att slippa mata in vågsedlar manuellt. Lastbilschaufförerna var mer skeptiska och kände sig övervakade genom att deras position hela tiden spåras av systemet, men såg vissa fördelar med att veta om det var kö eller inte vid läggaren. Ledningen såg stora fördelar med att kunna följa förloppet på distans och började redan under demonstrationerna diskutera vad som bör följas upp och mätas, för att få bättre kontroll på processen och inte minst utvärdera projekten efteråt. Det diskuterades också om att det kommer att krävas en ny tjänst i framtiden som kan avsätta tid för att kontinuerligt analysera och förbättra processen. Slutkunden representerades i projektet av Trafikverket, vilka ser positivt på möjligheterna att övervaka och dokumentera kvalitén och på så sätt minska behovet av efterkontroll. Minskad administration tillsammans med övriga effektiviseringar är också välkommet då det så småningom översätts i lägre kostnader, även för slutkund. Med en fullständigt dokumenterad process kan även kvalitén verifieras, vilket öppnar upp för att på sikt handla upp på funktion istället för utförande. Denna utveckling ser Trafikverket positivt på då det främjar utveckling och konkurrens i entreprenadbranschen. Att slutkunden också kan ta del av data via det digitala ekosystemet, ”system-of-systems”, är ytterligare en utveckling som inte bara minskar administrationen, utan även minskar risken för fel i de manuella översättningarna mellan de olika systemen.

4. NÄSTA STEG

Till demonstrationerna som gjordes inom ramen för detta utvecklingsprojekt användes i många fall temporär utrustning eller utrustning som egentligen är avsedd för andra ändamål. Detta fungerade i de flesta fall väl för att testa och visa tänkt funktion, men är i det långa loppet inte anpassad för att permanent sitta på maskinerna. Vidare var projektets ansats förhållandevis bred, ”from rock to road”, även om demonstratorn i slutet av projektet riktade fokus mot de sista stegen i kedjan. Det är därmed också här, från asfalttillverkning till färdiglagd väg, som det i nuläget finns mest erfarenheter att jobba vidare med för att ytterligare utveckla tekniken. Med längre mätserier och bättre mätutrustning blir det också intressant att göra kalkyler på CO₂-besparing och resursvinster.

Alternativt kan ett nästa steg fokusera på de tidigare momenten i kedjan såsom krossning av material och stenmaterialets väg till asfaltverket. Här finns också möjligheten att kroka i erfarenheter från tidigare utvecklingsprojekt som till exempel ”Electric Site” med elektrifierade och autonoma fordon, eller samordna med något av de många andra pågående projekten inom elektrifiering.

BILAGA 1

Vinnova sluttrapport Construction Factory Proof of Concept ver 2021-12-29



Construction Factory Proof of Concept

Slutrapport 2021-12-29

Jakob Axelsson (Mälardalens högskola)
Martin Aronsson (RISE)
Pär Hansson (RISE)
Marty Luby (Volvo Construction Equipment)
Roger Nilsson (Skanska)
David Rylander (RISE)
Peter Sjöberg (Volvo Construction Equipment)
Christian Spjutare (Volvo Construction Equipment)
Peter Wallin (Mälardalens högskola)
Jesper Åström (Volvo Construction Equipment)



SKANSKA



VINNOVA SBUF

Innehåll

Sammanfattning.....	5
Summary in English.....	7
1. Inledning.....	9
1.1. Anläggningsbranschens utmaningar.....	9
1.2. Projektidé.....	9
1.3. Förberedande aktiviteter.....	10
1.4. Översikt över rapporten.....	10
2. Översikt över projektet.....	11
2.1. Projektfakta.....	11
2.2. Övergripande syfte och mål.....	11
2.3. Hållbarhetsaspekter.....	11
2.4. Utmaningar i genomförandet.....	12
3. Aktiviteter och resultat per arbetspaket.....	13
3.1. Projektledning.....	13
3.2. Användningsfall och processer.....	14
3.2.1. Bergtäkt.....	14
3.2.2. Asfaltutläggning.....	15
3.3. Användargränssnitt.....	16
3.4. Planering och optimering.....	17
3.4.1. Att planera systematiskt.....	17
3.4.2. Representation och formalisering av planering.....	20
3.4.3. Planering av asfaltutläggning.....	21
3.4.4. Sammanfattning och resultat.....	24
3.5. Informationsrepresentation.....	24
3.5.1. Kartläggning av informationsbehov.....	25
3.5.2. Grundläggande informationskoncept.....	26
3.5.3. Ontologier.....	27
3.5.4. Utökad ontologi för asfaltutläggning.....	27
3.5.5. Analys av standarder och databaser för BIM och GIS.....	28
3.5.6. Resultat.....	29
3.6. Teknikplattform.....	30
3.6.1. Anpassning till RISE SoS Arena Testbed.....	31
3.6.2. Implementering av Industri 4.0-koncept.....	32
3.6.3. Demonstratorns teknikplattform.....	32
3.6.4. Resultat.....	34

3.7. Demonstrator	35
3.7.1. Planering av scenarier och fysisk demonstration	35
3.7.2. Anpassning av resurser.....	38
3.7.3. Genomförande av demonstration	40
3.7.4. Resultat.....	42
3.8. Effektivisering.....	43
3.8.1. Analys av värdeflödet i asfaltutläggning	43
3.8.2. Analys av transporter i dagbrott och bergtäkter	45
3.8.3. Resultat.....	45
3.9. Resultatspridning.....	45
4. Tänkbara fortsättningar	47
4.1. Klimat och miljö.....	47
4.2. Kvalitet och kostnader ur ett livscykelperspektiv.....	48
4.3. Upphandling och finansiering	48
4.4. Digitalisering.....	48
4.5. Automation och optimerad processtyrning	49
4.6. Omfattning.....	50
5. Slutsatser	51
5.1. Vägen framåt	51
Referenser.....	53
Bilaga 1: Projektdeltagare	55
Bilaga 2: Publikationer från projektet	57
Avhandling	57
Tidskrift.....	57
Konferenser	57

Sammanfattning

Projektet *Construction Factory Proof of Concept* har genomförts under 2018–21 som ett samarbete mellan Skanska, Volvo Construction Equipment, RISE, Mälardalens högskola och Trafikverket, med finansiering från Vinnova, SBUF och parterna. Denna rapport sammanfattar arbetet i projektet och uppnådda resultat.

Syftet med projektet var att förbättra produktivitet och kvalitet samt minska klimatpåverkan i anläggningsproduktion genom att digitalisera olika informationsflöden. Detta ger tillgång till väsentligt mer data, som kan användas för bättre planering, operativa beslut, och dokumentation. Inspirationen har hämtats från tillverkningsindustrin, med koncept såsom Lean produktion samt Industri 4.0 för digitalisering, men har anpassats till anläggningsbranschens speciella förutsättningar. Dessa inkluderar en mycket mer dynamisk process, där produktionen hela tiden förändras, och att flera olika organisationer samarbetar i ett system-av-system.

Projektet har omfattat resultat inom följande områden:

- *Användningsfall och processer.* En kartläggning har gjorts av viktiga processer i bergtäkter och vid asfaltutläggning, vilket legat till grund för att förstå vilka värden dessa skapar och vilken information som är viktig.
- *Användargränssnitt.* I de olika processerna har olika aktörer identifierats, för att förstå vad deras roll är, vilka beslut de kan fatta, och vilken information de behöver för detta. Speciellt har här asfaltutläggning studerats i detalj.
- *Planering och optimering.* Principer för att beskriva de metoder som används i processerna har tagits fram, och använts vid resursallokering och schemaläggning på såväl strategisk, taktisk och operativ nivå. Detta har tillämpats på asfaltutläggning, och speciellt på samspelet mellan läggare och vältar för att upprätthålla en kontinuerlig produktion.
- *Informationsrepresentation.* Principer har tagits fram för att digitalt representera den information som behövs kring anläggningsproduktion, och den grundläggande teknologin som valts är länkade data. Detta har innefattat att ta fram ontologier som beskriver de begrepp som används, vilket är viktigt för att uppnå interoperabilitet. Likaså har standarder för geografisk och geometrisk information analyserats.
- *Teknikplattform.* För att möjliggöra digital kommunikation mellan olika system har ett koncept för informationsgränssnitt från Industri 4.0 tillämpats. Detta har implementerats för simuleringar inom ramen för en befintlig testbädd, och denna har även använts för datainhämtning från verklig produktion.
- *Demonstration.* Två omfattande demonstrationer har genomförts i samband med verkliga asfaltutläggningsprojekt. Det ena omfattade ytor utanför en industrilokal i Bålsta, och det andra var asfaltering av E18 i Täby. Demonstrationerna omfattade att instrumentera olika maskiner, använda teknikplattformen för kommunikation och datalagring, samt löpande service och felsökning på plats. Totalt loggades många olika parametertyper från ett stort antal maskiner under flera veckors arbete.
- *Effektvalidering.* Baserat på den data som samlades in i demonstrationerna har olika analyser gjorts för att se vilka förbättringar som är möjliga, och fokus har legat på transportflödena. Dessutom har liknande analys gjorts på tidigare insamlade data från bergtäkter. Resultaten visar en stor potential i att förbättra produktivitet, kvalitet och energieffektivitet i arbetet.

Utöver detta har olika kommunikationsaktiviteter genomförts, och detta inkluderar även ett antal vetenskapliga publikationer och en doktorsavhandling.

Summary in English

The project *Construction Factory Proof of Concept* was carried out during 2018–21 as a collaboration between Skanska, Volvo Construction Equipment, RISE, Mälardalen University, and the Swedish Transport Administration, with funding from Vinnova, SBUF and the parties. This report summarizes the work in the project and the results achieved.

The purpose of the work has been to improve productivity and quality, and reduce climate effects in construction activities through the digitalization of information flows. This gives access to significantly more data, that can be used for better planning, operational decisions, and documentation. The inspiration has come from manufacturing, with concepts such as Lean production and Industry 4.0 for digitalization, but with adaptations to the special circumstances surrounding construction. This includes a much more dynamic process, where the production is in constant change, and many different organizations that collaborate in a system-of-systems.

The project has achieved results within the following areas:

- *Use cases and processes.* A mapping has been done of important processes in quarries and at road asphalt laying, which provides a foundation for understanding what values are created and which information is important.
- *User interfaces.* The actors in the various processes have been identified, to understand their roles and what decisions they can make, as well as which information is required for this. The information needs related to asphalt laying have been studied in-depth.
- *Planning and optimization.* Principles for describing the methods used in the processes have been developed and used for resource allocation and scheduling at a strategic, tactical, and operational level. This has been applied on asphalt laying, and in particular on the interactions between the paver and compactors to achieve continuous production.
- *Information representation.* Principles have been developed for the digital representation of information related to construction activities, and the technology called linked data has been selected as a basis. Ontologies have been constructed that describe the key concepts used, which is important to achieve interoperability. In addition, standards for geographical and geometrical information have been analyzed.
- *Technology platform.* To enable digital communication between various systems, a concept for information interfaces from Industry 4.0 has been applied. It has been implemented for simulations within an existing testbed, and this has also been used for data collection from live production.
- *Demonstration.* Two extensive demonstrations have been carried out in connection to real asphalt laying activities. The first was an asphalt surface in an industrial area in Bålsta, and the second was asphalt laying on the E18 highway in Täby. The demonstrations included instrumentation of different machines, utilizing the technology platform for communication and data storage, and continuous service and fault tracing on site. In total, many types of parameters from a large number of machines were recorded during several weeks of work.
- *Validation of effects.* Based on the data collected during the demonstrations, various analyses have been conducted to see what improvements are possible, and the focus has been on transportation flows. In addition, similar analysis has been carried out in previously collected data from quarries. The results show a large potential in improving productivity, quality, and energy efficiency.

Various communication activities have also been part of the project, and this includes several scientific publications and one doctoral dissertation.

1. Inledning

Det här dokumentet utgör slutrapport i projektet *Construction Factory Proof of Concept (CFPoC)*. Projektet har genomförts under 2018–2021 som ett samarbete mellan Skanska, Volvo Construction Equipment, RISE, Mälardalens högskola och Trafikverket, med finansiering från Vinnova (projektnummer 2018–03244), Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF) och parterna.

Tanken med dokumentet är att ge en fördjupad redovisning som främst riktar sig till projektets financiärer och deltagare, för att sammanfatta det arbete som gjorts och de resultat som uppnåtts. Mycket av detta har redovisats och offentliggjorts på andra sätt genom enskilda publikationer, avhandlingar och presentationer under projektets gång, men syftet här är att ge en samlad bild, som också kan ligga till grund för fortsättningsprojekt.

1.1. Anläggningsbranschens utmaningar

Anläggningsprojekt såsom byggen av vägar och andra infrastrukturer är oerhört komplexa, och har historiskt dragits med höga och ofta skenande kostnader (Flyvbjerg et al., 2003). Medan annan industri ökade sin produktivitet med ca 100% under perioden 1980 till 2013 så var motsvarande ökning i anläggningsindustrin under 10% i Sverige (Trafikanalys, 2015), och samma mönster rapporteras internationellt (McKinsey & Co., 2017). Branschen omsätter ca 100 miljarder kronor årligen i Sverige, och med den aktuella infrastrukturplanen för 2018–2029 där enbart staten satsar 700 miljarder kronor så kommer detta belopp att öka. Detta innebär att varje procents produktivitetsförbättring sparar minst en miljard kronor, vilket frigör resurser i samhället.

Reducerade kostnader går också hand i hand med minskad miljöpåverkan, eftersom energi (dvs. fossila bränslen) är en stor utgift. Forskning har visat att byggnation och underhåll av vägar står för 2,5–3 milj. ton CO₂ per år, vilket motsvarar 15% av utsläppen för inrikes transporter (KTH, 2012).

Att bygga med rätt kvalitet från början bidrar till ökad livslängd samt lägre klimatpåverkan vilket ger stora samhällsekonomiska effekter. Vidare minskas exponering av personal på vägen vilket bidrar till en säkrare arbetsmiljö samt mindre störningar av trafiken vid åtgärder.

Anläggningssektorn är i högsta grad mekaniserad och maskintillverkare har under lång tid fokuserat på att optimera dessa maskiner för maximal produktivitet, på senare tid med fokus på ökad grad av automation och elektrifiering. Dock står det alltmer klart att många frågor måste lösas på en högre nivå, med målet att optimera det övergripande flödet i produktionen mot högre kvalitet, ökad produktivitet, bättre resursutnyttjande, kortare ledtider och minskad miljöpåverkan. Här förlitar man sig inom branschen i stor utsträckning fortfarande på människor i både drift och ledning. Andra sektorer tillämpar däremot alltmer automation och optimering utifrån datadrivna analyser, vilket indikerar var förbättringar kan sättas in. I detta är informationshantering och utbyte av data en grundsten, vilket också uppmärksammats i Trafikverkets vision om det ”smarta projektet” (Trafikverket, 2012).

1.2. Projektidé

Läget i anläggningsindustrin liknar mycket det som tillverkningsindustrin stod i för några decennier sedan, och som har hanterats genom processflödesoptimering utifrån Lean-metoden samt automatisering. De senaste åren har denna utveckling fortsatt med Industri 4.0, där uppkopplad teknologi ger nya möjligheter till realtidsoptimering av produktionen och sammankoppling och effektivisering av längre flödeskedjor.

Projektets vision har varit att betrakta anläggningsproduktionen som en fabrik, Construction Factory, och tillämpa tillverkningsindustrins principer. Lösningarna innefattar byggblock såsom uppkopplade maskiner, informationshantering, och optimering utifrån Lean. Detta kan leda till en effektiv koordinering av maskiner, människor och data i en utsträckning som aldrig tidigare har förekommit i anläggningsbranschen. Initiala experiment visar att besparingspotentialen på t.ex. bränsle kan uppgå till flera tiotals procent (Rylander et al., 2014).

Dock finns ett antal specifika utmaningar för anläggningsbranschen som en Construction Factory behöver hantera. Specifikt gäller detta att själva ”fabriken” är dynamisk, och omdefinierar sig själv efterhand som produktionen framskrider och material flyttas. Den involverar också ett stort antal oberoende system och aktörer som måste samverka.

För att möjliggöra ett effektivt datautbyte mellan aktörerna med sikte på flödesoptimering måste man skapa ett system-av-system (eng. System-of-Systems, eller SoS; se Maier, 1998). Att tillämpa ett SoS-perspektiv möjliggör en optimering baserat på produktivitet för hela anläggningen snarare än för enskilda maskiner. Detta uppnås genom att med informations- och kommunikationsteknologi knyta ihop de olika oberoende system som idag samverkar enbart genom mänsklig kommunikation.

Det är viktigt att förstå att ökad automation förutsätter en förbättrad styrning av detta SoS som helhet, vilket kräver en väl genomtänkt arkitektur (Dersten et al., 2015). Man måste också definiera hur information av olika slag ska representeras, bland annat hur man uttrycker mål för hela byggverksamheten och för enskilda aktiviteter på ett för maskinerna entydigt sätt, hur man representerar geografien, och beskriver de tillgängliga maskinernas förmågor.

1.3. Förberedande aktiviteter

En kort inledande förstudie genomfördes av Mälardalens högskola, RISE och Volvo Construction Equipment inom samverkansprojektet Digitala stambanan under vintern 2017–18. Detta ledde sedan till ett projekt inom det strategiska innovationsprogrammet InfraSweden2030, där förutom tidigare parter också Sandvik deltog. I det projektet genomfördes en konceptstudie som identifierade krav och definierade en övergripande lösningsstruktur och systemarkitektur. I huvudsak var detta arbete analytiskt och resulterade i dokumentation.

Projektet som beskrivs i denna rapport bygger vidare på det identifierade konceptet, och säkerställer realiserbarheten genom en konceptvalidering (”proof-of-concept”). Detta innebär bland annat att fördjupa innehållet i ett antal delar i konceptet, samt genom simulering och omfattande fysiska demonstrationer visa att de önskade effekterna kan uppnås. Projektet har därför i större utsträckning än föregångarna genomförts med hjälp av prototyper och demonstratorer.

1.4. Översikt över rapporten

Resten av rapporten är strukturerad på följande sätt:

- **Kapitel 2** ger en översikt över projektet och dess deltagare, syfte och mål.
- **Kapitel 3** beskriver hur arbetet har organiserats, och går igenom innehållet i projektets nio arbetspaket samt de resultat som har uppnåtts i dessa.
- **Kapitel 4** diskuterar områden där ytterligare fördjupningar skulle behövas inom ramen för fortsättningar på detta projekt.
- **Kapitel 5** sammanfattar rapporten och de viktigaste slutsatserna.
- **Bilaga 1** sammanställer vilka personer som har deltagit i projektet.
- **Bilaga 2** ger referenser till de publikationer som projektet har resulterat i.

2. Översikt över projektet

I det här kapitlet ges en översikt över projektet, både i form av lite grundläggande fakta, övergripande syfte och mål, samt hållbarhetsaspekter. Dessutom beskrivs några utmaningar som påverkat genomförandet.

2.1. Projektfakta

Projektansökan till Vinnova lämnades in i slutet av augusti 2018 och beviljades två månader senare. Den formella projektstarten skedde omgående, men verksamheten var starkt begränsad fram till sommaren 2019. Projektet var ursprungligen tänkt att avslutas 2020-12-31, men kom att förlängas i ett par steg till 2021-11-30. Orsakerna till förskjutningen av tidplanen beskrivs i avsnitt 2.4 nedan.

Projektet hade en total budget om 10,1 MSEK. Av budgeten fördelades Vinnovas bidrag om 5 MSEK till de två forskningsutförarna Mälardalens högskola och RISE. Industriföretagen Skanska och Volvo finansierade sitt eget deltagande med totalt 5 MSEK, varav Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF) bidrog med 1 MSEK. De resterande 0,1 MSEK utgjorde Trafikverkets finansiering av sin egen insats. Totalt har 19 personer från de olika parterna direkt deltagit i olika former i projektet, och dessa redovisas i Bilaga 1. Till detta ska läggas ett stort antal ytterligare personer som varit inblandade i det praktiska genomförandet av projektets demonstrationer, såsom läggarlag, lastbilsförare, underleverantörer, etc.

2.2. Övergripande syfte och mål

Projektets övergripande syfte var att validera konceptet ”Construction Factory” vars principer tagits fram i tidigare projekt. Detta avsågs göras dels genom att detaljera konstruktionen av vissa nyckelkomponenter, dels genom att visa att dessa kan uppnå de förväntade effekterna i demonstrationer. Dessa effekter innefattar en påtaglig höjning av produktiviteten och en minskning av energiåtgången vid anläggningsproduktion, utifrån exemplet vägbyggnad.

Projektets konkreta mål var att:

1. Ta fram tekniska lösningar och offentliggöra forskningsresultat som visar att konceptet kan realiserats som tänkt.
2. Validera att konceptet kan stödja projektledare och driftsansvariga i planerings- och optimeringsarbetet så att förbättringarna kan identifieras och hanteras.
3. Validera att konceptet utifrån dessa planer kan stödja maskinoperatörer i att utföra arbetet så att effekterna realiserats.

I kapitel 5 nedan kommenteras i vilken utsträckning syfte och mål har uppfyllts.

2.3. Hållbarhetsaspekter

I ansökan analyserades projektet utifrån hur det skulle kunna bidra till FN:s hållbarhetsmål i Agenda 2030, och följande målområden bedömdes då som mest relevanta:

- **Mål 8. Anständiga arbetsvillkor och ekonomisk tillväxt.** Högre produktivitet (delmål 8.2) är ett huvudsyfte med projektet, liksom att bryta sambandet mellan tillväxt och miljöförstöring (8.4). Många delmål förutsätter en utbyggd transportinfrastruktur, t.ex. hållbar turism (8.9) som skapar lokala arbetstillfällen. Konceptet som föreslås är en förutsättning för ökad automation,

och kan därigenom bidra till att vissa farliga arbetsuppgifter försvinner (8.8), men kan då å andra sidan försvåra möjligheten att nå full sysselsättning (8.5).

- **Mål 9. Hållbar industri, innovationer och infrastruktur.** Att bygga ut infrastruktur av hög kvalitet (9.1) och att verka för industrialisering (9.2) är delmål som direkt kopplar till projektet.
- **Mål 11. Hållbara städer och samhällen.** En utbyggnad av transportsystem (11.2) kräver stora investeringar, som enklare genomförs med effektivare produktion.
- **Mål 12. Hållbar konsumtion och produktion.** Effektivt utnyttjande av naturresurser (12.2), såsom stenmaterial och petroleumprodukter som används i vägar är exempel på hållbar produktion som projektet främjar. Mer miljövänlig hantering av kemikalier under livscykeln (12.4) förenklas genom bättre spårbarhet av exakt var olika kemikalier har använts vid vägproduktionen, för att minska problemen vid framtida återvinning.
- **Mål 13. Bekämpa klimatförändringen.** Detta mål fokuserar på hantering av konsekvenser av klimatförändring, och innefattar bl.a. att stärka motståndskraften mot klimatrelaterade faror (13.1), vilket kan innebära förstärkning av anläggningar som blir ekonomiskt möjligt med effektivare produktion.

Den största hållbarhetspåverkan handlar alltså om miljön, där lägre bränsleåtgång, mindre materialåtgång, mm bidrar, liksom större möjligheter till återvinning genom bättre dokumentation av vad man faktiskt har byggt. Likaså är effekterna på ekonomisk hållbarhet stora genom effektivisering, som frigör utrymme för fler investeringar i transportinfrastruktur, vilket leder till många andra positiva effekter. Värt att notera är att dessa möjligheter är globala, och i minst lika stor utsträckning kan komma utvecklingsländer till del.

Fokus på hållbarhet har således funnits med från början i projektet, men under den tid som arbetet pågått har främst klimatfrågorna kommit att betonas alltmer, och då främst relaterat till de omfattande koldioxidutsläpp som branschen traditionellt orsakar. I slutfasen av projektet har det blivit tydligt att klimatfrågan numera utgör en minst lika viktig förändringskraft i branschen som produktivitet och ekonomi.

2.4. Utmaningar i genomförandet

Som nämndes i avsnitt 2.1 ovan drabbades projektet av flera förseningar:

- Under tiden som Vinnova behandlade ansökan skedde organisationsförändringar inom Skanska, och de personer på företaget som hade berett ansökan var inte längre tillgängliga. Detta ledde till en försenad start av projektet och ett startmöte med alla parter hölls först i augusti 2019.
- I mars 2020 drabbade Covid19-pandemin Sverige, vilket påverkade arbetet i stor utsträckning. Dels så var Volvos personal permitterade under ett antal månader, varvid deras insats stannade av. Dessutom var det under stora delar av projektet omöjligt att genomföra fysiska möten.
- Projektet innehöll omfattande fysiska demonstrationer inom ramen för skarpa anläggningsarbeten. Då projektet valde att fokusera på asfaltutläggning blev demonstrationerna därmed också säsons- och väderberoende vilket ledde till anpassningar av tidplanen. I detta ingick även viss anpassning till när nödvändiga maskiner fanns tillgängliga.

Trots dessa förseningar har projektet i allt väsentligt kunnat fullföljas vad gäller innehållet, tack vare flexibilitet och engagemang hos parterna och stor förståelse för omständigheterna hos Vinnova.

3. Aktiviteter och resultat per arbetspaket

Arbetet i projektet har organiserats i nio arbetspaket (AP), se figur 1. AP2 och AP3 har huvudsakligen varit användarcentrerade, och kartlagt viktiga användningsfall och deras informationsbehov. Detta har legat till grund för de lite mer teoretiska AP4 och AP5, som har tagit fram planeringsmetoder respektive de informationstekniska grundprinciperna. AP6 har sedan realiserat dessa principer i en teknikplattform, som använts i demonstrationer i AP7. I demonstrationerna har mycket data samlats in och baserat på detta har effektanalyser gjorts i AP8. AP1 har lett projektet och AP9 har verkat för att sprida resultaten externt på olika sätt, och dessa AP har interagerat med alla de övriga.

Varje arbetspaket har haft en arbetspaketledare och ett antal deltagare, där många personer också deltagit i flera arbetspaket vilket borgat för en god överhörning. Arbetspaketen har i stor utsträckning organiserat sitt eget arbete och genomfört många möten och aktiviteter av olika slag.

I resten av det här kapitlet beskrivs arbetspaketen mer i detalj med avseende på aktiviteter och resultat.

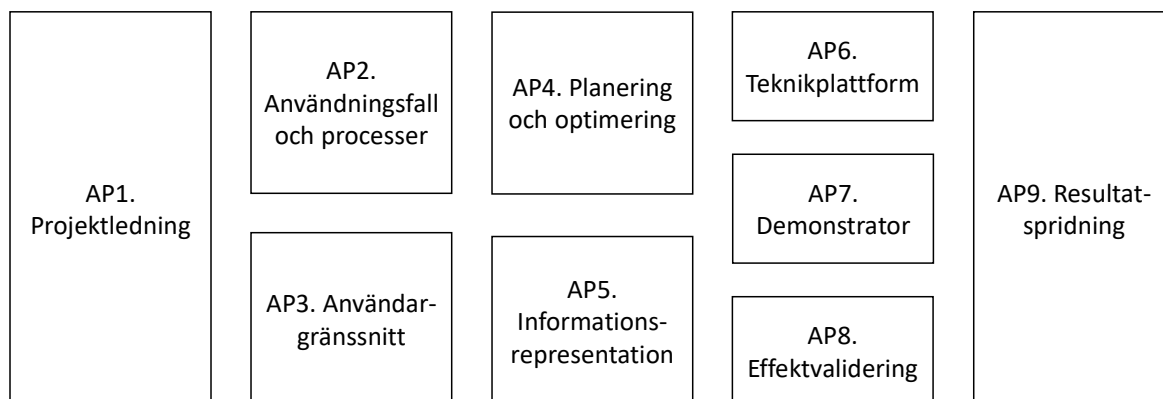
3.1. Projektledning

Projektets ledningsgrupp har bestått av en projektledare från Mälardalens högskola, en representant från varje projektpart, samt projektledarna för vart och ett av arbetspaketen. Då några personer har haft flera roller har ledningsgruppen totalt bestått av åtta personer. Ledningsgruppen har träffats regelbundet, typiskt med två till fyra veckors mellanrum, och totalt vid närmare 40 tillfällen.

Projektet har också haft en mindre styrgrupp som bestått av de personer som varit huvudrepresentant för respektive projektpart. Styrgruppen har främst hanterat formella frågor kring avtal, avgörande förändringar i projektplaner, och liknande.

Ungefär en gång i halvåret har också alla deltagare i projektet samlats till heldags stormöten, totalt fem gånger. Vid dessa möten har syftet varit att skapa en helhetsbild över vad som gjorts samt planerna framåt, och vid flera av tillfällena har också olika former av workshops genomförts.

En betydande del av projektledningsarbetet har handlat om att hantera de olika utmaningar som redovisats i avsnitt 2.4 ovan. Detta har underlättats av parternas stora engagemang och den gemensamma synen som funnits kring hur viktigt detta projekt är.



Figur 1. Översikt över projektets arbetspaket (AP).

Arbetspaketet har också hanterat relationen till Vinnova som finansiär, och givet de ganska turbulenta omständigheterna så har så mycket som åtta formella ändringar behövts göras. Dessutom har totalt nio olika rapporter gjorts till Vinnova, vilket också varit en viktig del av ledningsarbetet.

3.2. Användningsfall och processer

Arbetspaket 2 syftade till att kartlägga och modellera de anläggningsverksamheter som Construction Factory-konceptet ska kunna stödja. Genom att förstå dessa processer och användningsfall blir det också tydligare vilken information som är väsentlig att samla in och förmedla. Processkunskapen är också viktig för att identifiera vilka underlag som beslutsfattare på olika nivåer kan behöva (se avsnitt 3.3), för att stödja planering och optimering (avsnitt 3.4), och för att detaljera hur informationen ska representeras (avsnitt 3.5). Likaså utgjorde denna inventering av användningsfall en grund för vad som skulle visas i projektets demonstration (avsnitt 3.7). De anläggningsprocesser som har studerats omfattar främst bergtäkt och asfaltutläggning på väg, samt logistik till och från asfaltverk. De främsta källorna till analysen har varit intervjuer och arbetsmöten med personer i branschen, platsbesök samt befintlig dokumentation.

3.2.1. Bergtäkt

I bergtäkten är de viktigaste processerna losstagning av berg (t.ex. genom sprängning), krossning och siktning av material, samt transporter från losstagning till krossar och vidare till lager och utleverans. Ofta sker krossningen i flera steg, både med mobila och stationära krossar, beroende på hur stor och permanent bergtäkten är. Lagring sker i högar, där olika fraktioner (stenmaterial av olika storlekar) är separerade.

Ett antal olika aktörer deltar i arbetet i bergtäkten, och de har olika behov av information:

- *Arbetsledare*: Arbetsledaren är en administrativ roll som ansvarar för produktionsplanering på kort och lång sikt. För detta krävs kunskap om ordergång, driftstatus, tillgängliga maskiner och deras skick, m.m.
- *Lastmaskinoperatör*: Lastningen sker oftast med antingen hjullastare eller grävmaskiner. Förutom att lasta maskiner när de kommer fram, så ägnar sig operatören även åt uppgifter såsom att flytta undan tappade stenar, sortera undan stenar som är för stora för krossning och behöver knackas sönder först, mm. Detta sorteringsarbete görs mellan lastningarna, och därför har operatören nytta av kunskap om transportflödet och när stopp sker i krossningen.
- *Transportmaskinoperatör*: Transporter sker oftast med olika typer av dumprar, ramstyrda eller stela. Lastning görs av lastmaskinen, och avlastning görs antingen genom att tippa i en hög på marken, eller i ett tråg i en kross. På större permanenta bergtäkter finns dessutom ibland fasta transportband. Även dessa operatörer behöver ha information om flödet för att undvika stillestånd, önskad ankomsttid för att minimera bränsleåtgången genom att inte köra onödigt fort och sedan vänta, samt vilken rutt man ska köra om det finns flera lastnings- eller avlastningsplatser.
- *Krossoperatör*: Krossningen är i stor utsträckning en automatiserad process, men en operatör kan behöva justera olika typer av parametrar beroende på stenmaterialets egenskaper och vilka fraktioner som ska produceras vilket kräver information om aktuell driftstatus. När mobila krossar används så kan dessa också behöva flyttas emellanåt, i takt med att losstagningen åter sig in i berget, och det är då viktigt att kunna planera dessa förflyttningar för att minska produktionsbortfallet.
- *Vågoperatör*: Invägning samt utvägning görs av allt krossmaterial, och detta samordnas med digitala system för försäljning, logistik samt fakturering.

- *Serviceingenjör*: För att upprätthålla en effektiv produktion behöver serviceingenjörer regelbundet byta ut olika slitdelar. Detta kan göras mer effektivt med korrekt information om status och prognos på dessa delar, samt kunskap om den övergripande produktionsplaneringen så att service kan göras samordnat när det påverkar processen så lite som möjligt.

3.2.2. Asfaltutläggning

Asfaltutläggning innefattar ett antal processer, bestående av förberedelse, etablering, produktion, och avetablering. I var och en av dessa deltar olika aktörer och utrustning.

Förberedelse

I förberedelsefasen planeras arbetet. Detta innefattar att analysera krav som ställts i kontraktet, inklusive funktionella och geometriska egenskaper såsom tvärfall, jämnhet och friktion. Därefter görs en arbetsberedning, som innefattar att planera hur arbetet ska göras på platsen, inklusive trafiksituation, buffertzoner, mätpunkter, m.m. Det bestäms vilken typ av asfalt som ska användas, utifrån dess packningsegenskaper, samt transportavstånd till asfaltverk och hur det påverkar temperaturen vid läggning. Det behöver även planeras för förberedande arbete, som fräsning av gammal asfalt eller justering av ytan för att komma till rätt startnivå för det nya skiktet. I detta steg planeras även för logistik av material samt kapacitet vid utläggning.

Etablering

Vid etableringen förbereds arbetet på platsen, genom att skärma av arbetsområdet från övrig trafik. Här används både statiska avskärningsmarkeringar och s.k. TMA-bilar (Truck Mounted Attenuator, dvs. en lastbil med ett påkörningskydd och ljusmarkeringar). Maskiner, personal och material som behövs transporteras till platsen. Vidare markeras start och stopp samt övriga relevanta data (t.ex. bredd, tjocklek, sektion mm.)

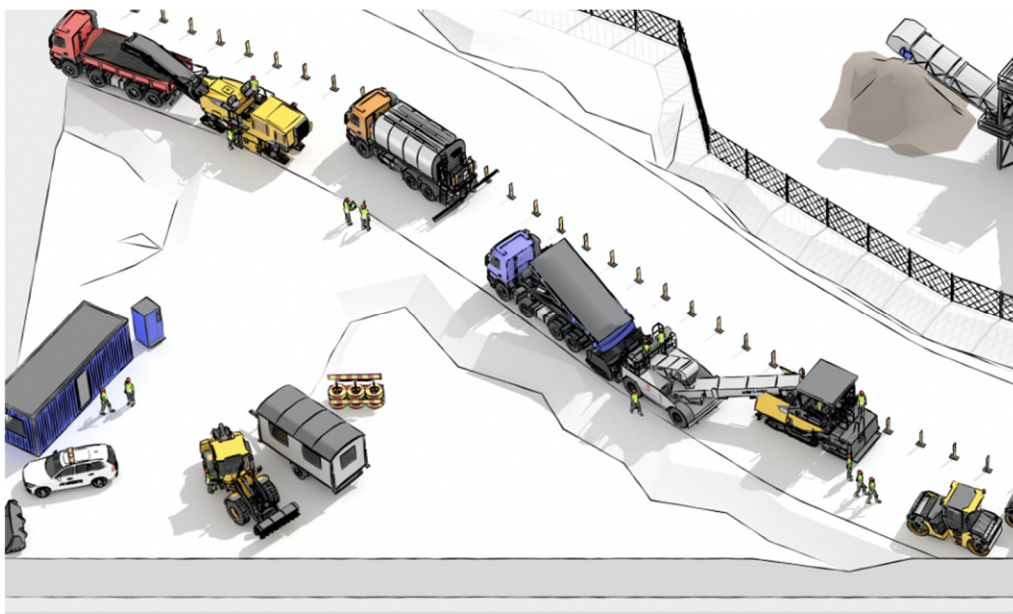
Produktion

Produktion består principiellt av fyra huvudprocesser: förberedelser, transport av material, utläggning samt packning.

Som förberedelse för läggningen justeras eventuellt ytan som skall beläggas, dvs. gammal asfalt fräses bort, och transporteras till återanvändning eller deponi, alternativt justeras upp till rätt nivå/tvärfall. Därefter sker klistring, med hjälp av en s.k. *klistermoppe*, och detta görs för att den nya asfalten ska fästa bättre i underlaget. Oftast sker detta någon eller några timmar innan asfalt ska läggas.

Under själva produktionen rör sig ett tåg av maskiner framåt i jämn takt (se figur 2):

- Den centrala delen är *asfaltläggaren*, som bestämmer produktionstakten. Den består av ett tråg där en mindre mängd asfalt lagras, ett internt transportband som förflyttar asfalt från tråget till skriden, som jämnar till och kompakterar asfaltlagret på vägen.
- Asfalten transporteras från asfaltverket till asfaltläggaren med *lastbilar*, och dessa behöver komma i jämn takt för att det inte ska bli avbrott i utläggningen. Lastbilen ställer sig direkt framför asfaltläggaren, och tippar sin last i läggarens tråg efterhand som den förbrukas. Laggaren puttar lastbilen framför sig. När lastbilen har tömt sin last återvänder den till verket för att hämta en ny last, och medan nästa lastbil kör fram fortsätter laggaren med det material den har i tråget.
- Ofta används ett mellanlager, en s.k. *shuttle buggy*, som tar plats emellan lastbilen och laggaren. Shuttle buggyn bidrar till ökad kvalitet genom att säkerställa jämnare materialflöde samt minska separationer och temperaturvariationer i asfaltmaterialet.
- Bakom laggaren går en eller flera *vältar*. Deras uppgift är att kompaktera asfalten genom att köra fram och tillbaka över den, och det är då viktigt att alla delar av ytan får rätt antal överfarer för att uppnå önskad packningsgrad. Här spelar också asfaltens temperatur stor roll, och om



Figur 2. Asfaltutläggningsprocessen, med lastbil, fräs, klisterbil, shuttle buggy, läggare och vältar.

denna blir för låg är packningen inte längre möjlig. Därför spelar vädret roll för avsvälningen, och tiden som finns tillgänglig blir också begränsad.

Förutom dessa maskiner behövs även servicefordon, såsom vattenbilar för att förse vältarna med det vatten de behöver för att undvika att asfalten klibbar fast i valsarna. Exempel på andra servicefordon är liten hjullastare, tankbil, lagbil, labbuss för kvalitetsuppföljning, m.fl.

Avetablering

Vid avetableringen flyttas maskiner, personal och annan utrustning från arbetsplatsen, och avskärmningar och avstängningar tas bort.

Efter utförd utläggning sammanställs dokumentation, vilket inkluderar vågsedlar, dagbok, kvalitetsuppföljning som visar utlevererad asfalt från verket, resultat från utförd kvalitetstestning av uppborrade provkroppar, väderförhållanden etc.

3.3. Användargränssnitt

Construction Factory handlar främst om ett koncept för att förmedla digital information mellan olika delar av anläggningsproduktionen, som idag inte kommunicerar kontinuerligt med varandra. Därigenom möjliggörs bättre beslut på olika nivåer i produktionsstyrningen, och det lägger också en grund för automatisering och optimering. Arbetspaket 3 handlar om användarperspektivet, och fokus har varit på vilken information olika användare skulle ha nytta av för att fatta bättre beslut. Däremot har mindre vikt lagts vid hur informationen ska presenteras för användarna, utan här har i stället i möjligaste mån befintliga system använts (t.ex. Volvos Co-Pilot som redan finns monterad på många maskiner).

Analysen i detta arbetspaket har utgått ifrån aktörer som identifierades i arbetspaket 2 (se föregående avsnitt). För varje aktör beskrevs sedan dennes uppgift eller mål, vilka beslut aktören kan fatta för att utföra uppgiften, och slutligen vilken information som skulle behövas för dessa beslut. När informationsbehoven på så sätt blivit kartlagda, är nästa steg att undersöka hur informationen kan samlas in av systemen, och här är maskinernas integrerade datorsystem viktiga datakällor. Dessa kompletteras

med extern utrustning för ytterligare mätningar, såväl som med manuell inmatning av operatörer för information som är svår att mäta på annat sätt.

Några exempel på aktörsanalysen är:

- *Lagbas*. Lagbasen planerar arbetet på plats och ett övergripande mål är att lägga asfalten enligt plan. Ett delmål är att undvika onödiga skarvar då dessa försämrar kvaliteten. För detta behöver lagbasen ha koll på flödet av lastbilar från asfaltverket för att undvika stopp p.g.a. materialbrist, och även ha koll på vältkapaciteten så att välterna hinner med att kompaktera i den takt asfalten läggs ut. De beslut som finns att välja på är främst att anpassa läggarens hastighet för att undvika ett stopp.
- *Skridoperatör*. Längst bak på asfaltläggaren finns skriden som jämnar ut och kompakterar asfalten som läggs ut. Målet här är att upprätthålla rätt tjocklek, bredd, tvärfall, skevningsövergångar mm. För tunt skikt ger sämre kvalitet/livslängd, och för tjockt skikt ökar kostnaden och kan vid stora avvikelser även försämrare kvaliteten. Ofta är skridoperatören samma person som lagbasen, och de beslut som fattas handlar om hur skriden ska ställas in.
- *Lastbilsförare*. De lastbilar som levererar asfalt från verket har som övergripande mål att leverera i läggarens tråg i rätt tid och vid rätt temperatur. För detta behövs information om när bilen ska hämta asfalt, när den ska levereras till läggaren, samt hur den ska manövrera på platsen för avlastning. Förarens beslut handlar om att välja rutt och hastighet för att säkerställa att tidskraven uppfylls, och att kommunicera eventuella avvikelser.
- *Vältförare*. Den nylagda asfalten ska packas till tillräcklig packningsgrad, och det egentliga målet kan uttryckas som densitet. Det är dock svårt att mäta detta i realtid, och därför utgår man i stället ifrån att ett visst antal vältöverfarter behövs för att uppnå rätt packningsgrad. Målet blir därför att säkerställa att alla delar av ytan har körts över tillräckligt antal gånger. Förarens beslut handlar om att välja både hastighet, frekvens, amplitud och rutt, vilket kräver information om hur mycket varje del av ytan har bearbetats. Det är dessutom ofta ett samspel mellan flera vältrar som tillsammans ska uppnå täckning, och dessa behöver ha koll på varandra. Principen är densamma om ett packningssystem används, där antal överfarter byts ut mot någon typ av packningsvärde.

3.4. Planering och optimering

För att effektivisera anläggningsproduktionen med avseende på lägre klimatpåverkan och kostnad för specifik kvalitet, behövs åtgärder som bättre använder och samordnar de tillgängliga produktionsresurserna. Det blir då viktigt att förbättra hur arbetet planeras, och med tillgång till mer information kan planeringen också optimeras matematiskt och automatiseras. Arbetspaket 4 har därför fokuserat på planering och optimering.

I detta avsnitt ges först en allmän beskrivning av vilka komponenter som systematisk planering består av. Utifrån dessa komponenter analyseras sedan anläggningsindustrins verksamhet. Därefter introduceras ett antal formalismer från litteraturen, både för hierarkisk planering och sammansatt planering med flera fristående aktörer. Slutligen tillämpas dessa på asfaltutläggning, med huvudsakligt fokus på samspelet mellan vält och läggare.

3.4.1. Att planera systematiskt

Varje plan utgår från ett mål som ska uppnås. Det kan vara att producera ett hus, tillverka ett visst stål, anlägga en väg eller genomföra en transport. Varje mål kan spaltas upp i delmål som i sin tur kan delas upp i ytterligare delmål. Vid någon nivå anses dessa mål ha nått atomär nivå, d.v.s. de som läser planen är helt på det klara med hur det delmålet ska uppnås. En sådan aktivitet kallar vi här för en *atomär aktivitet*.

För att uppnå ett *atomärt delmål* utförs en atomär aktivitet. Denna aktivitet har som resultat att delmålet är uppnått¹. Aktiviteter kan vara beroende av varandra², och då måste en aktivitet genomföras före en annan i enlighet med aktiviteternas inbördes beroende.

Metoder

Sekvenser av aktiviteter som återkommer i olika sammanhang kan sättas samman till namnsatta *metoder*. En sådan metod i samband med husbyggnad kan vara hur en mellanvägg byggs där dess delaktiviteter kan vara regeluppsättning, elinstallation, isolering samt uppsättning av gipsskivor. Resultatet är att mellanväggen finns på plats. Således kan det överordnade målet, att en mellanvägg finns på plats, och dess motsvarande aktivitet ”bygga mellanvägg”, delas upp i delaktiviteterna bygga stomme, installera el och montera gipsskivor, med beroenden dem emellan. För stommen finns det flera varianter, t.ex. kan träregel eller stålregel användas. Inom asfaltering kan tumregler för hur en vält rör sig över den nylagda asfalten ses som metoder.

Metoder är beskrivningar av hur ett visst mål uppnås genom ett systematiskt förfaringssätt, där målet bryts ner till delmål. Olika metoder kan uppnå samma mål, men med t.ex. olika kvalitet, genomförandetid, resursanvändning, etc. Val av rätt metoder ger rätt kvalitet, kostnad och genomförandetid för projektet.

Resursallokering

Genom metodvalen så uppstår logiska beroenden mellan aktiviteterna. Dock kan inte genomförandetider för aktiviteterna beräknas förrän de har tilldelats resurser. Mängden tillgängliga resurser kan dock vara begränsad, liksom mängden resurser som kan användas i varje aktivitet.

Genom resurssättningen uppstår ytterligare beroenden mellan aktiviteterna. Antag t.ex. att det bara finns en enda elektriker. Då uppstår det beroenden mellan de olika elinstallationerna på byggarbetsplatsen eftersom installationerna måste läggas i sekvens p.g.a. resursberoendet av elektrikern.

Schemaläggning

Schemaläggning innebär att start- och sluttider ansätts till samtliga aktiviteter, på ett sådant sätt att beroendena inte bryts. Dessa beroenden inkluderar också att resurser inte överbelastas. I fallet med den ensamma elektrikern vet vi att inga av dennes aktiviteter får överlappa varandra, däremot kan ordningen mellan dem väljas så att det blir effektivast för både elektrikern och hela byggnationen. Det är alltså vanligt att resursallokering och schemaläggning utförs gemensamt eftersom resurstillgången påverkar genomförandetiden för aktiviteterna. Metodvalet behöver däremot utföras separat eftersom det ju leder fram till vilka aktiviteter som ska genomföras, och olika metoder leder till olika aktiviteter.

Har metodval och resurssättning gjorts på ett bra sätt så kan ett effektivt schema skapas vilket ofta översätts till kort total genomförandetid. Andra önskemål är att resurserna används effektivt (mycket tid till värdeskapande arbete), rätt kvalitet samt att planen är robust, d.v.s. har återställningsförmåga och utrymme för parerande insatser om något skulle förlöpa lite annorlunda än tänkt.

Om däremot schemaläggning leder till långa ledtider, mycket stillestånd i den tidsatta planen eller dåligt utnyttjande av resurserna så behöver andra val göras vid resursallokering eller metodval. Det är på dessa nivåer som val görs, och det är där som mycket av planens effektivitet avgörs.

¹ Egentligen åstadkommer aktiviteten en tillståndsförändring då den genomförs. Denna tillståndsförändring i världen ska helst kunna observeras så att vi ”vet” att aktiviteten lett till det resultat som den var avsedd att leda till. Detta steg hoppar vi över i denna beskrivning och antar helt enkelt att aktiviteten lyckas med det den ska åstadkomma.

² Egentligen är den efterföljande aktiviteten beroende av att den föregående aktiviteten har lett till ett tillstånd i världen så att den efterföljande aktiviteten kan starta, t.ex. då våning ett är klar kan våning två påbörjas.

Strategisk, taktisk och operativ planeringsfas

Tidsmässigt delas ofta planeringen upp i strategisk, taktisk och operativ fas. Planeringen i dessa faser genomgår ofta alla tre stegen metodval, resurssättning och schemaläggning, det är snarare detaljering och osäkerhetsbedömningen som skiftar mellan faserna.

I tidiga faser sker planeringen mer abstrakt och uttrycks t.ex. som hur mycket ställtid som bedöms som realistisk. Ställtid är då resurser ställs om eller transporteras för att sättas i bruk på annan plats. Ställtid är nödvändig, men då den inte är värdeskapande så ska den så långt möjligt minimeras.

- *Strategiska fasen* bestämmer inriktningen på produktionen: volymer, grova tidsindelningar, vilka (kritiska) resurser som ska användas till vilken produkttyp och när, etc. Det är i denna fas som t.ex. eventuella förstärkningar eller förändringar av produktionsapparaten bestäms. Det är också här som det avgörs vilka produkttyper som ska kunna produceras. Stora underhållsinsatser läggs också in i planen på denna nivå då de påverkar möjlig produktion över tid. I branscher där produktionen upphandlas i projektform är den strategiska nivån en del av anbudsprocessen, t.ex. i bygg- och anläggningsindustrin.
- *Taktiska fasen* syftar till att fastställa produktionsmål samt i övrigt ta resultatet från den strategiska fasen och förfina dessa, samt i förekommande fall justera och anpassa produktionsmålen. Här sker val av mer produktionsnära metoder, samt resursallokering och schemaläggning.
- *Operativa fasen* genomför produktionen. Den planering som utförs på denna nivå sker ofta löpande och med målet att upprätthålla satta leveranstider. Fasen innehåller dock samma moment som de tidigare, d.v.s. metodval, resursallokering och schemaläggning ingår även här, dock med målet att ligga i linje med tidigare framtagna planer och framför allt leveranser.

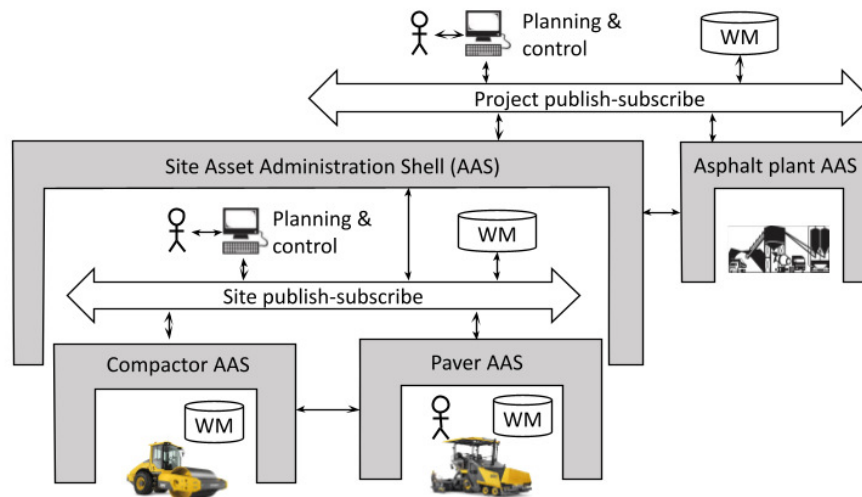
Det är värt att notera att även om en tidigare planeringsfas sätter förutsättningar för senare faser, så måste de tidigare faserna ha goda kunskaper om vad som är realistiskt att uppnå på nästa nivå. Likaså kan en iteration behövas om man upptäcker i nästa fas att det inte var möjligt att verkställa den plan som togs fram i föregående fas.

Aktörer

I komplexa projekt deltar vanligtvis flera delvis oberoende aktörer. Var och en har sin egen planering och mål, och de måste samverka för att åstadkomma ett gemensamt resultat. Olika aktörer är också aktiva i olika planeringsfaser, och mål ärvs ofta från tidigare faser:

- Vid strategisk planering är det vanligt att det är en aktör som planerar genomförandet men där många uppgifter kommer utföras av andra aktörer som kontrakteras. Hänsyn behöver tas till vilka resurser som finns tillgängliga och deras begränsningar (kapacitet, kvalitet, tillgänglighet etc.).
- I taktisk planering sker ofta förhandling och kompromissande mellan olika aktörer, t.ex. vid kontraktsskrivning och upphandling. I denna fas brukar delresultat och deras färdigställande slås fast liksom kvaliteten på arbetet om det inte är ett resultat från den strategiska planeringen.
- Slutligen finns i den operativa fasen ett mycket intrikat samspel mellan aktörerna vid genomförandet av aktiviteterna då planer ska realiseras och leveranser ske. Leveranser kan vara både större överlämningar av färdiga produkter, såväl som mindre omfattande resultat, t.ex. en last asfalt eller vatten till en vält.

Figur 3 visar hur olika aktörer samverkar i ett system-av-system för anläggningsarbete. Figuren visar också hur arbetet organiseras hierarkiskt, och högre nivåer i hierarkin motsvarar tidigare faser i planeringen. Varje aktör agerar i viss mån självständigt med leveranser, uppgifter och aktiviteter enligt egen planering. T.ex. är de rörelser som välten genomför ett resultat av förarens kontinuerliga operativa



Figur 3. Ett hierarkiskt system-av-system för anläggningsproduktion.

planering för att åstadkomma packning i enlighet med kraven, som ursprungligen getts i beskrivningar och avtal.

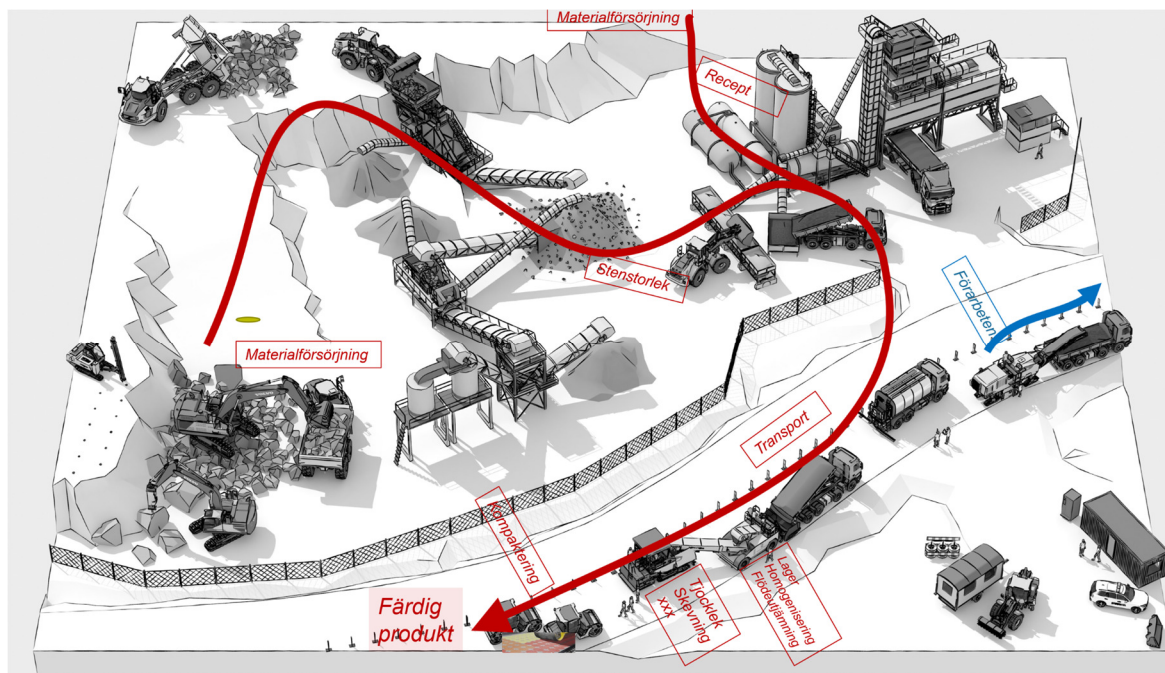
3.4.2. Representation och formalisering av planering

De principer för systematisk planering som beskrivits ovan är allmängiltiga, och används i många sammanhang manuellt. Tumregler, som är en form av metodmässigt förfarande, formas från tidigare erfarenheter och i viss mån maggropskänsla. I takt med att komplexiteten i arbetet växer räcker dock detta inte till, och bättre resultat kan nås genom datorstöd. Detta blir särskilt relevant i en dynamisk miljö såsom anläggningsproduktion, där förutsättningarna ändras kontinuerligt och planeringen behöver anpassas löpande. Konceptet Construction Factory möjliggör både automatisk insamling av data och användande av datorstöd som bygger ett system-av-system där automatiserad planering är en grundfråga.

Ämnet planering har studerats länge och har genom åren delats upp i flera underområden. Det finns ett underområde som ägnats åt planering som en intellektuell process, området ”planning” inom framför allt symbolisk AI. Ett tidigt och trendsättande arbete inom detta område var Nilssons system STRIPS (Fikes & Nilsson, 1971). STRIPS beräknar sekvenser av handlingar för enkla planeringsproblem såsom vilken sekvens av handlingar som krävs för att stapla klossar på ett visst sätt för att nå ett på förhand beskrivet sluttillstånd. Nilssons system byggde på att atomära handlingar formuleras som förvillkor (vad måste vara uppfyllt), slutresultat (vad är sant efter handlingen) samt själva handlingen. Mycket av efterföljande forskning inom området har byggt på denna grundläggande beskrivning. STRIPS sökte dock efter en sekvens av handlingar utan någon hierarkisk struktur i termer av mål och delmål.

Ur området ”planning” har det därefter utvecklats beskrivnings- och beräkningsformalismer för hierarkisk planering där en komplex uppgift bryts ned i gradvis enklare uppgifter till dess att en för uppgiften atomär nivå uppnåtts. Detta har gradvis gått från att betraktas som AI till att beskrivas som olika representationer och formalismer. Dessa har mött mer industriellt använda metoder såsom Work Breakdown Structure (WBS). Sådana formalismer, och system byggda på dessa, uppvisar intressanta egenskaper för ”vårt” problem inom anläggningsindustrin, nedbrytning av ett omfattande komplext mål i delmål samt flera aktörer som realiserar olika delmål. Detta är giltigt från projekteringen till och med produktionen av vägen.

Vi har använt Hierarchical Task Networks (Georgievski & Aiello, 2014) för att studera och analysera olika delar av anläggningsindustrins verksamhet, först verksamheten på en bergtäkt för att senare mer i



Figur 4. Översikt över processen för asfaltproduktion och utläggning.

detalj studera själva asfaltutläggningen. Med HTN kan beräkningar göras som syftar till att hitta effektiva sekvenser av aktiviteter som uppnår överordnade, komplexa mål samtidigt som metoderna är explicit givna, typiskt beskrivna från "best practice", t.ex. hur en vält rör sig för att uppnå rätt packningsgrad på asfalten.

För samspelet mellan olika fristående aktörer (maskiner m.m.) har vi använt Simple Temporal Networks (STN; Mogali et al., 2016). Inom det ramverket går det att resonera om att olika aktörers aktiviteter behöver synkroniseras på olika sätt (sekvensering, nödvändig parallellism, etc.) respektive vara frikopplade från varandra.

Från ca halva projekttiden har vi i AP4 i huvudsak koncentrerat oss på det användningsfall som utgörs av asfaltutläggning: vält, läggare och materialförsörjning från lastbilar (se avsnitt 3.2.2). Detta fall har visat sig innehålla dels viktiga frågeställningar för beställaren (t.ex. Trafikverket: kvalitetsaspekter), utföraren (effektivitet, kvalitet, upphandlade resurser), och externa upphandlade aktörer (lastbilar).

3.4.3. Planering av asfaltutläggning

I arbetspaket 4 har principerna för planering studerats utifrån tillämpningen asfaltutläggning. Figur 4 visar schematiskt flödet av material från grustäkt och asfaltverk till arbetsplatsen där utläggning av asfalt samt packning sker. Flera intrikata samband finns längs detta materialflöde. Bergmaterial av rätt storlek och bitumen ska finnas tillgängligt, vilket kräver materiallager, siktning mm. Framställning av varm asfalt sker först då hela kedjan är redo, eftersom asfalten kyls när den har lastats på, och måste då hinna transporteras till arbetsplatsen innan den blir för kall för att läggas ut och packas.

På arbetsplatsen måste alla förberedelser vara klar, såsom fräsning av gammal asfalt eller färdig underbyggnad vid nyanläggning. Arbetet ska vara väl förberett av genomförandepersonal så att markeringar för t.ex. tvärfall och andra inställningar i maskinerna finns längs arbetets längd. Maskiner ska vara förberedda. Då tåget av maskiner sätts i rörelse ska helst inga stopp ske, eftersom stopp kräver speciell hantering i skarven som då uppstår. Således är ett viktigt mål att hålla maskintåget i rörelse, men däremot kan hastigheten på tåget varieras efterhand.

Den uppgift som studerats i mer detalj i arbetspaket 4 är hur hastigheten på tåget kan hållas så hög som möjligt med rätt kvalitet på färdig slityta. Hastigheten avgörs av flera faktorer:

- Läggarens hastighet
- Försörjningen av asfalt från lastbilar (läggaren får inte bli tom, kö ska helst inte uppstå)
- Välten eller vältarna ska dels hinna med att packa asfalten vid rätt temperatur (inte för kallt, inte för varmt), dels ha rätt antal överfarter på varje del av asfaltsytan, och dels hinna med att tanka vatten då och då.

Vältarna rör sig fram och åter bakom läggaren vilket kan göra det svårt att avgöra färdigställandegraden på utlagd asfalt. Det kan också vara svårt att säkerställa en jämn tillförsel av asfalt med rätt temperatur. Därför används ofta en s.k. ”shuttle buggy”, som är en form av rörligt mellanlager före läggaren där lastbilarna tippar sin asfalt. På det sättet jämnas både temperaturen och flödet av asfalt ut, vilket minskar risken för stopp på grund av materialbrist.

Det testfall arbetspaket 4 studerat utgår från samspelet mellan läggare och vält.

Samspelet mellan läggare och vält

Mellan läggare och vält finns ett helt avgörande samspel för kvaliteten på lagd asfalt. Dels uppträder ett krav att packa asfalten då den lagts ut på vägbanan av den s.k. skriden (fördelaren av asfalt längst bak på läggaren), dels avgörs kvaliteten på slitytan i stor utsträckning av vältarnas efterföljande packning.

Om läggaren har högre kapacitet än vältarnas produktionstakt så kan den komma att köra ifrån vältarna, vilket leder till att vältarna bearbetar för kall asfalt. Detta kan i sin tur leda till kvalitetsproblem eller att fler överfarter behövs. Utöver detta kan vältarnas produktionstakt komma att sjunka än mer om fler överfarter behövs.

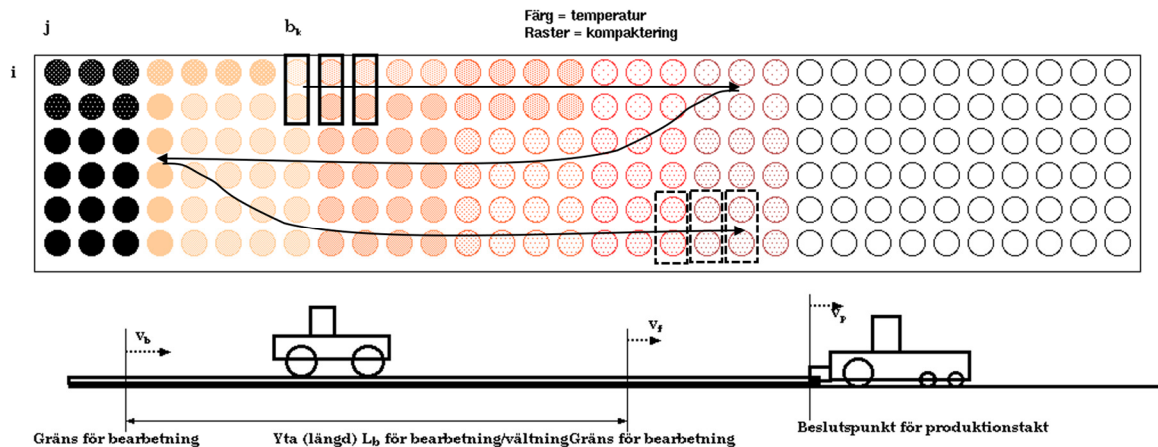
Om å andra sidan läggaren kör långsamt (långsammare än vad som är möjligt) så kan vältarna med råge hinna med bakom, och produktionstakten blir då onödigt låg vilket leder till sämre effektivitet.

Tillsammans utgör detta ett optimeringsproblem: Totalt sett ska läggaren hålla ett så högt tempo att vältarna precis hänger med (inklusive då packningen temporärt behöver ändras vid t.ex. tvärfall, brunnar eller liknande samt vattenförsörjning). Ju snabbare hela tåget kan köra och ändå hinna med att åstadkomma rätt kvalitet, desto bättre effektivitet. För att åstadkomma detta krävs att en återkoppling om situationen bakifrån och framåt i tåget säkerställs.

Läggaren är i detta sammanhang den enkla resursen att modellera. Den rör sig framåt med en viss hastighet som visserligen kan varieras, men den passerar bara en gång över varje del av vägen. Vältarna är däremot mer komplicerade att modellera.

Då vältarna rör sig fram och tillbaka så kan inte vältarnas rörelse användas direkt för en bedömning av hur de ligger till i sitt arbete att packa massan. I stället behöver en tillståndsbild skapas av hur mycket arbete vältarna har framför sig, och med vilken hastighet som detta arbete genomförs i snitt. Således behöver tillståndet och den gradvisa förändringen av det omvandlas till en färdigställandehastighet för vältarnas verksamhet. Detta blir enklare att göra om vi delar upp vägens yta i en mängd mindre, lika stora ytor (se Figur 5). En sådan mindre yta kan vara ett par eller några decimeter i fyrkant och är en *atomär produktionsenhet (APE)*.

Varje APE har påbörjats i läggaren och placeras ut då den lämnar skriden. Den packas sedan av vältarna, och antalet överfarter över varje APE ska vara optimalt. APE:n svalnar efter att den lämnar skriden, så det finns ett begränsat tidsspänn då vältarna måste packa den. Det är denna avsvälning som gör att optimeringsproblemet uppstår, för om hänsyn inte behöver tas till avsvälningen så skulle läggaren och vältens temporala sammankoppling kunna frikopplas.



Figur 5. Laggarnas arbete uppdelat i atomära produktionsenheter (APE).

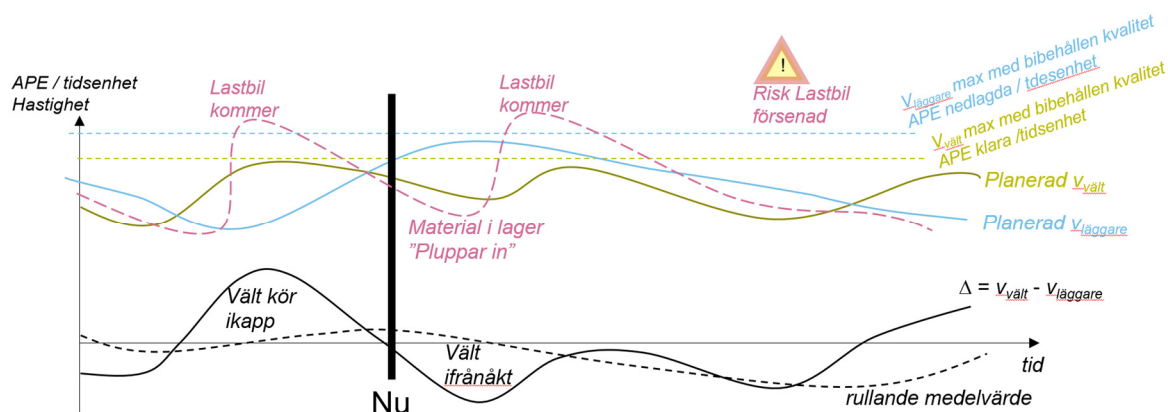
I varje ögonblick finns således ett tillstånd där varje APE har ett krav på ett antal överfarter och varje vält finns i en viss position. Att passera alla APE på ett korrekt sätt och i tid innan avsvälningen har gått för långt är matematiskt att betrakta som ett s.k. temporalt handelsresandeproblem, och dessa är beräkningsmässigt mycket svåra att lösa helt optimalt, utan man får förlita sig på approximativa heuristiska metoder. Dessutom är det tveksamt om det är rimligt att skapa den optimala planen för välten då föraren förmodligen inte har förutsättningar att följa den in i minsta detalj.

En heuristisk ansats kan inspireras av hur schemaläggning görs för flygplansbesättningar. Metoden går ut på att dela upp problemet i två faser: först genereras ett större antal möjliga vältturer som var och en täcker ett urval av de APE:er som finns. Viktigt med denna generering är att alla APE:er är täckta tillräckligt många gånger så att kvalitetsvillkoret på antal överfarter kan uppfyllas. Därefter sker ett optimerat urval ur denna mängd turer som täcker alla APE:er det antal gånger de ska packas. Beräkningen av ett sådant urval kallas för mängdtäckning (set cover). Initiala test med denna modellering visar på bättre prestanda än att direkt beräkna optimum. Det förutsätter att genereringen kan göras effektiv, vilket är troligt då det finns ett antal tumregler för lämpliga rörelser med välten som används idag. Mängden möjliga turer kan genom detta begränsas men samtidigt utökas gentemot vad föraren av välten förmodligen hanterar manuellt och under tidspress idag. Det kan därför ligga till grund för körstödssystem och automatisering som bättre utnyttjar vältarna.

Förslag på enklare mätning ur ett SoS-perspektiv

De ovan presenterade metoderna utgör mer avancerade sätt att planera vältens rörelser, och dessa kräver ytterligare utvecklingsarbete. En enklare ansats skulle dock vara möjlig att implementera i ett kortare perspektiv, och den baserar sig på hur många överfarter av APE:er som välten har framför sig. Om antalet kommande överfarter (d.v.s. vältens arbete) ökar med tid så kör laggaren för fort och behöver sänka farten. Om å andra sidan antalet APE:er under behandling ligger på en stabil nivå hinner välten med, men det kan också vara så att takten skulle kunna ökas och att välten inte utnyttjar sin kapacitet fullt ut. Detta eftersom det inte går att veta om välten arbetar så fort den kan eller har en lägre arbetstakt än vad den skulle kunna ha.

Givet att vi kan omvandla vältens arbete i en hastighet framåt (uttryckt som kvalitetssäkrade färdiga APE:er per tidsenhet) så kan en graf skapas (se figur 6). Den blå kurvan gäller för laggaren, som har lite bättre nominell prestanda än välten (grön linje). Den faktiska historiska hastigheten för de båda maskinerna är inritad före ”nu” och den planerade/prognosticerade hastigheten är införd efter ”nu” (t.ex. med hänsyn till brunnar, vattentankning etc.).



Figur 6. Relation mellan läggare och vältars arbetstakt över tid.

De svarta linjerna nederst utgör skillnaden mellan läggaren och välten. Om derivatan av hastighetskillnaden mellan läggare och vält är positiv så kör läggaren fortare än välten, annars kör välten ikapp läggaren. Genom att ansätta ett flytande medelvärde så kan trender visas över tid.

Det är en fördel om även materialflödet in till läggaren kan uttryckas som APE:er. Detta eftersom det då är enklare att förutse hur tillståndet i materialförsörjningen till skriden ser ut, både i läggaren, i shuttle buggyn och i de lastbilar som är på väg samt kopplat till vältarna och till färdig väg. I de övre graferna visas hur materialsituationen kan följas över tid och där det finns en risk för att materialförsörjningen störs. Genom att visualisera konsekvenserna samt hur mycket produktion som finns i "lager" kan hastigheten (uttryckt i APE:er per tidsenhet) anpassas i tid så att inte läggaren och hela tåget måste stanna på grund av materialbrist.

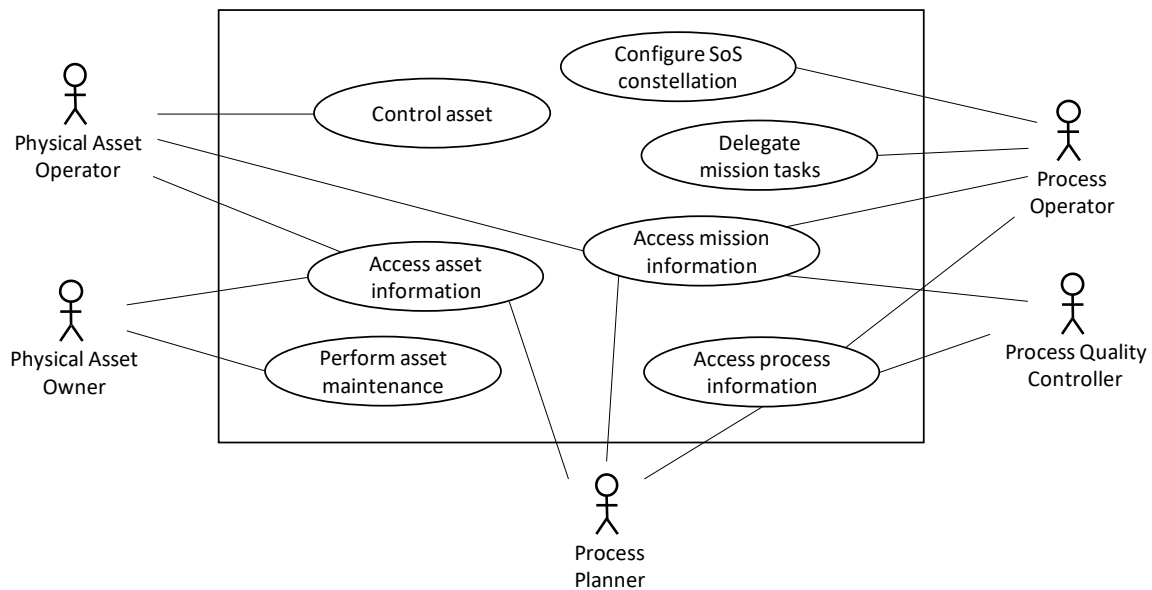
3.4.4. Sammanfattning och resultat

I scenariot för asfaltutläggning visar samverkan och statusdelning mellan framför allt vält och läggare på möjligheterna att styra verksamheten utifrån kända faktorer (sensorer, tillstånd etc.) hos respektive aktör då värdena kan utbytas mellan dem och trender m.m. kan beräknas. Genom sammanställning kan en totalbild av produktionen erhållas och därigenom framförhållning skapas vilket ger möjlighet till styrning och kontroll av den sammansatta processen. Mått och steg kan tas både i preventivt syfte och då störningar uppkommer. Effektiviteten kan ökas utan avkall på kvaliteten genom kännedom om hur andra aktörer ligger till i den gemensamma asfalteringsprocessen. Scenariot är ett exempel på ett system-av-system då det bygger på att de olika självständiga systemen och deras operatörer samverkar.

Arbetspaketet har genomfört större delen av de ursprungligen planerade aktiviteterna. Vi har hittat lämpliga formalismer för att representera anläggningsindustrins uppgifter, där det är flera aktörer inblandade. De användningsfall som tagits fram i andra arbetspaket har väglett arbetet då vi fokuserat på att formalisera vägens färdigställande och hur detta kan mätas för att åstadkomma ett effektivare genomförande. Under arbetet har enklare experiment programmerats, bl.a. en optimeringsmodell för vältens körschema. Däremot har planeringsmetoderna ännu inte använts och validerats i verklig anläggningsproduktion, utan detta behöver göras i uppföljande projekt.

3.5. Informationsrepresentation

Konceptet Construction Factory handlar mycket om att samla in, bearbeta, och förmedla information mellan olika aktörer, så att dessa kan använda informationen för beslutsfattande på olika nivåer i anläggningsproduktionen. Många olika sorters information är relevant, både konkreta saker såsom kartor och mätvärden från maskiner, och abstrakta begrepp som planer, uppdrag och förmågor. Vidare



Figur 7. Informationsrelaterade användningsfall för olika aktörer.

behöver den kunna behandlas och presenteras på olika sätt för olika aktörer. Det räcker inte heller att hitta sätt att representera individuella datapunkter, utan det är också nödvändigt att beskriva relationerna mellan olika typer av data som en grund för interoperabilitet mellan olika användare, d.v.s. att dessa förstår och använder informationen på samma vis. Detta gör att informationsrepresentation är en central fråga, och detta har varit fokus för arbetspaket 5 i projektet. Informationen som representeras utgör basen för flera andra arbetspaket, såsom AP3 som tittar på användargränssnitt för att presentera informationen, AP4 som använder informationen för planering och optimering, och AP6 som inlemmar den i en teknisk plattform.

3.5.1. Kartläggning av informationsbehov

Utifrån de olika tillämpningar som finns inom anläggningsbranschen, har ett antal användningsfall identifierats (se avsnitt 3.2 ovan), och dessa har abstraherats till ett antal generiska användningsfall och aktörer, vilket illustreras i figur 7. Informationsbehoven för de olika aktörerna är:

- Maskinoperatör/maskin:
 - Få information om arbetet som ska utföras.
 - Få information om området där arbetet ska utföras.
 - Uppdatera information om hur området ser ut efter olika steg i arbetet.
- Maskinägare:
 - Få information om var underhåll kan utföras, inklusive tankning eller laddning av batterier.
- Processplanerare:
 - Få information om arbetet som ska utföras (från närmaste högre processnivå).
 - Uppdatera information om hur arbetet ska utföras (denna processnivå).
 - Få information om området där arbetet ska utföras.
 - Uppdatera information om hur området ser ut efter olika steg i arbetet.
- Processoperatör:
 - Få information om hur arbetet ska utföras.
 - Delegera uppgifter till enheter på nästa lägre processnivå.
- Kvalitetsansvarig:
 - Få uppgifter om planerat arbete att utföra.

- Få uppgifter om utfört arbete.
- Beskriva avvikelser.

Många slag av information utmärks av att de är komplexa och relationella, och det är därför viktigt att hitta ett generellt angreppssätt som möjliggör stor flexibilitet i vilka slags information som kan representeras.

3.5.2. Grundläggande informationskoncept

I de tidigare projekten under paraplyet Construction Factory var fokus på att ta fram grundläggande koncept och en systemarkitektur. Detta arbete fortsatte i detta projekt genom ytterligare förfiningar av tidigare resultat. Centralt i detta är valet att representera information som s.k. länkade data.

Länkade data

Länkade data är ett begrepp som kommer från webb-området. Den ursprungliga webben baserades på ett par grundkoncept, nämligen universella adresser (URL) som gör det möjligt att länka webbsidor med varandra, och språket HTML som beskriver hur en sida ska visas. Ganska snart insåg man dock att det var svårt att komma åt och tolka all den information som finns på webben annat än för människor. Man vidareutvecklade då konceptet för att göra det lättare för andra program att söka och använda information, och detta krävde att man la till semantisk information som ger ledtrådar om betydelsen.

Istället för att ha länkar mellan webbsidor talar man här om länkar mellan godtyckliga data, där varje dataenhet benämns en resurs och representeras av en unik resursidentifierare (URI). Länkarna kan då beskrivas med tripplar, där delarna benämns subjekt, predikat och objekt. Subjektet och predikatet är alltid URI:er, och objektet är antingen en URI eller ett konstant värde.

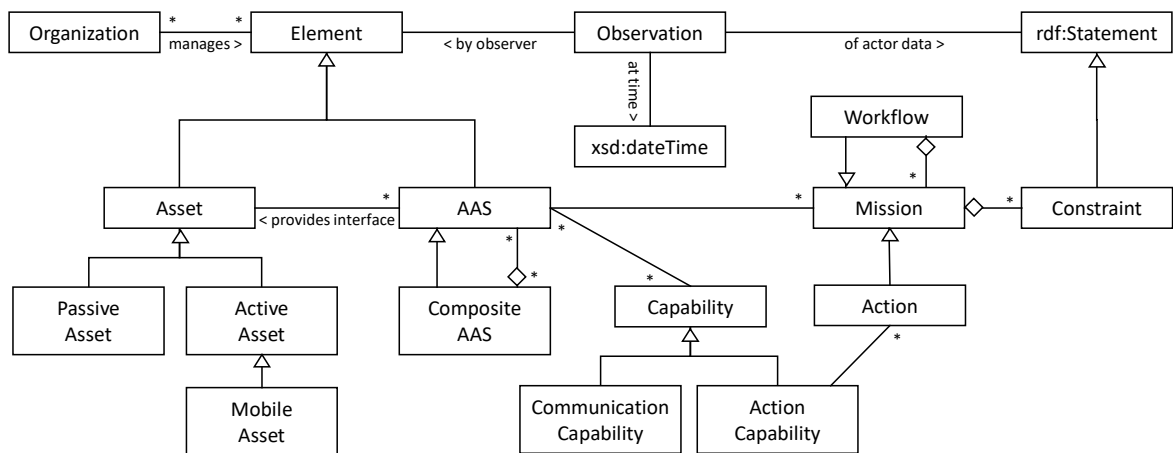
Eftersom resurserna kan vara både konkreta saker och abstrakta begrepp, kan tripplar användas för att bygga upp en rik vokabulär, och särskilt de abstrakta begreppen är användbara för att förmedla mer komplex mening. Till exempel kan man införa URI:er som namnger klasser av objekt, relatera klasser till varandra genom att ange att en klass är en delmängd av en annan, beskriva att ett objekt tillhör en viss klass, att en viss klass av objekt har vissa egenskaper, eller att en viss egenskap hos ett konkret objekt har ett visst värde.

Industri 4.0

Länkade data har kommit att användas i många andra tillämpningar än webben för att strukturera komplex information och ge den mening. Ett exempel är Industri 4.0, där länkade data används för att beskriva olika tillgångar (assets) och dess egenskaper, och för att förmedla information om tillgångarnas förmågor. Man talar där även om Asset Administration Shells (AAS) som är ett ”informationsskal” som man lägger runt en fysisk tillgång, och som möjliggör att man kan koppla ihop olika tillgångar med varandra i ett system-av-system.

Idéerna från Industri 4.0 om användning av länkade data, tillgångar och AAS var också en utgångspunkt i detta projekt. Tack vare den stora spridning som länkade data har fått, så har också en bred flora av tekniska lösningar tagits fram. Detta handlar bl.a. om programvarubibliotek för att läsa in länkade data från textfiler och manipulera tripplarna på olika sätt, och databaser som gör det möjligt att hantera mycket stora datamängder. Det finns också ett standardiserat frågespråk, SPARQL, som kan användas för att effektivt söka i databaserna.

Kommunikation av länkade data görs enklast på textformat, och man kan då använda standardlösningar för internetkommunikation som också är tillgängliga i många olika former. Interoperabilitet uppnås genom att man inte bara skickar t.ex. mätdata, utan också tillhandahåller semantisk information. Genom att inte bara den konkreta informationen, utan även den abstrakta semantiska informationen, är maskinläsbar så blir det möjligt för program att utbyta semantisk information med varandra, och att definiera nya typer av klasser, relationer och egenskaper som inte är hårdkodade från början.



Figur 8. Basontologi för tillgångar, förmågor och uppdrag.

3.5.3. Ontologier

En viktig del i att använda länkade data för en viss tillämpning handlar om att skapa en grundläggande ontologi, som definierar de olika begrepp som ska användas och hur de är relaterade till varandra. De generella abstrakta begrepp som nämndes i förra stycket (klasser, relationer, egenskaper) utgör ett språk som används för att beskriva ontologin, och sedan tillför man olika tillämpningsspecifika begrepp och beskriver relationerna mellan dessa.

I tidigare faser av projektet har vi tagit fram en sådan basontologi (se figur 8), som fångar nyckelbegrepp för att beskriva den typ av verksamhet som sker i anläggningsbranschen, och validerat den i tillämpningen bergtäkt. Exempel på grundbegrepp som tas upp är tillgångar, som kan vara passiva (t.ex. en hög med material) eller aktiva (t.ex. en maskin). De aktiva tillgångarna kan dessutom vara mobila, t.ex. en hjullastare. För varje tillgångsslag beskrivs dess olika förmågor, t.ex. att en hjullastare kan lyfta upp material, transportera material, och lägga ner det igen. Vidare beskrivs begrepp som arbetsflöden, uppdrag och observationer. Dessa är viktiga för den hierarkiska kommunikationen, där en arbetsledning kan planera arbetet utifrån de beskrivningar som finns av olika tillgängliga enheters förmågor, och sedan bryta ner ett större arbete i enskilda uppdrag till de enheter som finns på nästa lägre nivå. Observationer från lägre nivåer förmedlas till högre för att dessa ska kunna följa hur arbetet framskrider.

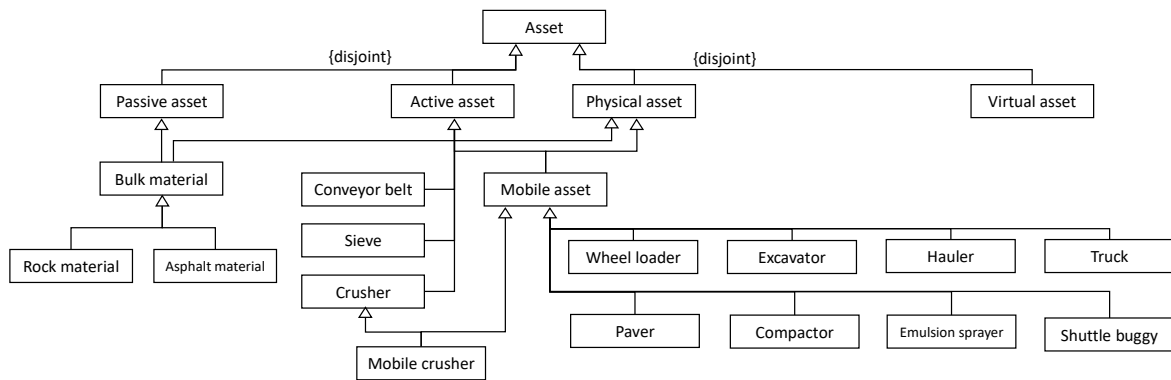
Utifrån basontologin så kan mer specifika typer av tillgångar beskrivas, och för fallet bergtäkt är detta främst de maskiner som används där, såsom grävmaskiner och hjullastare för att ta upp material, dumprar för transport över längre sträckor, och krossar och siktare för bearbetning av materialet.

3.5.4. Utökad ontologi för asfaltutläggning

I detta projekt har fokus varit på tillämpningen asfaltutläggning, och för att förstå vilka informationsbehov som finns där så har en omfattande kartläggning gjorts. Denna har sedan legat till grund för att utvidga basontologin för bergtäkt till att även täcka asfaltering (se figur 9).

Till de viktigare tilläggen hör att de maskiner som används vid asfaltering, såsom läggare och vältar, har betydligt mer komplexa förmågor än dumprar och krossar, och därmed finns också fler val att göra för operatörer (se figur 10). Detta behöver också avspeglas i de modeller som tas fram. Detsamma gäller för själva asfaltmaterialet, som behöver beskrivas med fler egenskaper och som också har en annan dynamik än stenmaterial, vad gäller avsvälning och hur den svarar på kompaktering.

Floran av maskiner som används i anläggningsproduktionen är omfattande, och en mer generell konceptualisering har påbörjats av de mobila maskinerna. Detta innefattar olika metoder för framdrift



Figur 9. Fördjupad ontologi för olika typer av tillgångar.

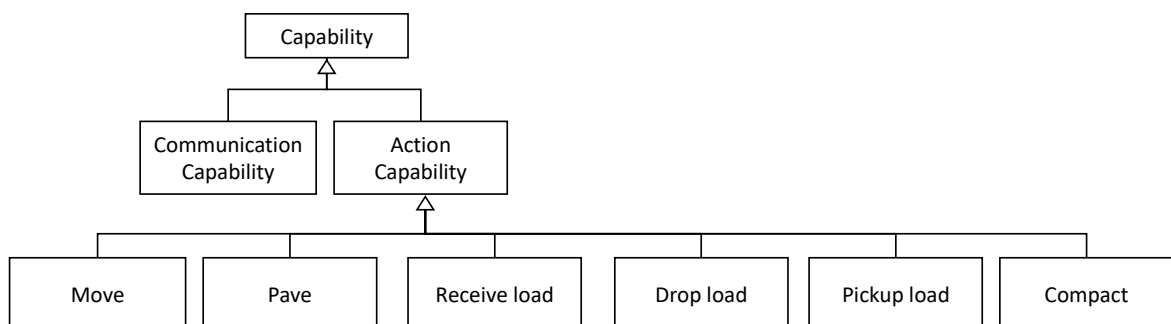
(gummihjul, band eller ståltrummor), styrning (hjul, midja eller slirning) eller energiomvandling (elektrisk eller förbränning), vilket visas i figur 11. Utan tvekan går denna påbörjade ontologi att fördjupa och förfina ytterligare, men erfarenheten är att länkade data så här långt har fungerat bra och sannolikt kan användas även framöver.

3.5.5. Analys av standarder och databaser för BIM och GIS

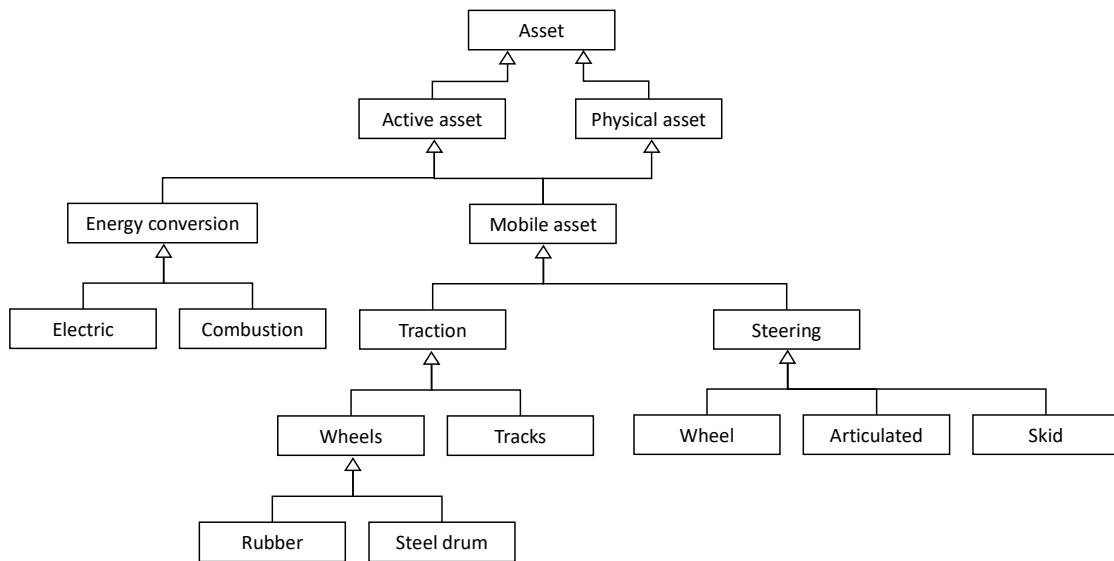
Förutom maskiner och deras förmågor behöver också olika typer av geometrisk och geografisk information behandlas i betydligt större utsträckning vid vägbyggen än i bergtäkter. För att kunna beskriva ett uppdrag som handlar om att bygga en ny väg måste man känna till den ursprungliga topografin både ovan och under jord, för att kunna planera hur mycket massor som behöver schaktas bort där vägkroppen ska byggas upp. Man behöver också beskriva hur det tänkta slutresultatet ska se ut. Efterhand som bergmassor flyttas dit byggs en ny topografi sedan upp, och bearbetas genom vältning m.m., och till slut läggs asfalten på. Även för asfalten är tre dimensioner relevant, och krav ställs bl.a. på lagrens tjocklek och vägens tvärfall i olika punkter.

Därutöver består en väg också av mer avgränsade artificiella komponenter, såsom broar, som byggs upp i landskapet och deras geometri behöver representeras, liksom geometrin för de maskiner som ska röra sig i området under arbetet.

I projektet har en genomlysning gjorts av olika standarder för dels geometrisk information i byggindustrin, och dels geografisk information såsom den används i geografiska informationssystem (GIS). Den geometriska bygginformationen brukar benämnas Building Information Model (BIM) och används i bl.a. CAD-programvaror. Den BIM-standard som ser ut att ha fått störst genomslag är Industry Foundation Classes (IFC). I GIS-sammanhang finns en uppsjö olika äldre standarder, men i nuläget



Figur 10. Fördjupad ontologi för maskiners utförandeförmågor.



Figur 11. Fördjupad ontologi för maskiners energiomvandling, framdrift och styrning.

verkar alltmer fokus läggas på Geography Markup Language (GML). Arbetet pågår att närma IFC och GML med varandra, bl.a. för att bättre beskriva infrastruktur. En stor fördel är att båda informationsmodellerna har stöd för att representeras som länkade data, vilket gör att de tekniskt kan kombineras fritt med varandra och med de ontologier som projektet tagit fram. Samtidigt finns visst begreppsmässigt överlapp mellan IFC och GML, och det är därför en fördel om man i en viss tillämpning kan välja vilken av representationerna som ska användas.

När en trippeldatabas innehåller geografisk information så är det önskvärt att också kunna söka utifrån geografiska kriterier, såsom att informationen berör ett visst område. Vissa databaser är speciellt anpassade för detta, genom att de indexerar informationen även för geografisk sökning, vilket ökar prestandan. SPARQL-standarden för frågespråk har fått en utökning, GeoSPARQL, som lägger till spatiala sökbegrepp. I projektet har en del experiment gjorts med två databaser som implementerar geografiskt stöd, nämligen Parliament och Fuseki, som båda är fritt tillgängliga. Den preliminära slutsatsen är att Fuseki är förstahandsvalet för fördjupade studier inom ämnet.

3.5.6. Resultat

De viktigaste resultaten relaterade till informationsrepresentation är:

- De generella informationsbehoven har identifierats, och innefattar behov för planering, drift och uppföljning på olika nivåer i hierarkin.
- De tekniska principerna för representation och kommunikation har definierats. Grunden är länkade data som representation, kombinerat med generiska och domänspecifika ontologier för att ge semantisk information som möjliggör interoperabilitet.
- En generell ontologi har tagits fram som beskriver nyckelbegrepp såsom tillgångar, förmågor, uppdrag och observationer.
- Specifika ontologier för anläggningsproduktion har utvecklats, där mer detaljer om olika maskiner och material tas upp. Speciellt har bergtäkt och asfaltutläggning studerats mer noggrant.
- Befintliga standarder för geografisk och geometrisk information har inventerats, och slutsatsen är att en kombination av standarderna IFC och GML sannolikt är en lämplig bas för anläggningstillämpningar.

Många av resultaten har testats praktiskt genom implementation av mjukvaruprototyper och simuleringar, och de har också presenterats i flera vetenskapliga artiklar (se bilaga 2).

Även om projektet har nått långt inom området informationsrepresentation så återstår mycket:

- Arbetet i projektet har huvudsakligen syftat till att validera de grundläggande koncepten, såsom användning av länkade data och ontologier. Däremot har inte utrymme funnits att utveckla fullständiga beskrivningar, och ett stort arbete återstår med att specificera alla konkreta typer av information som kan vara aktuell. Detta bör kombineras med standardisering, för att säkerställa en så bred och enhetlig användning som möjligt i branschen.
- Vissa typer av information behöver fördjupas. Detta gäller t.ex. väderdata, som hanterats ytterst rudimentärt i projektet, men som har stor påverkan på asfaltutläggning vad gäller avkylning av utlagda massor.
- En annan utmaning är diskretisering av information som inte har en naturlig uppdelning. För att kunna beskriva en asfaltytas egenskaper måste man dela in den i småbitar och beskriva var och en av dessa för sig, men vilken upplösning ska man välja? Sannolikt beror önskad upplösning på vem som ska använda informationen och det kräver alternativa parallella representationer av samma fysiska verklighet.
- Konceptet för informationsrepresentation utgör en bra grund för digitala tvillingar. För dessa räcker det dock inte med att bara strukturera vilka relationer som finns, och hur olika delar relaterar till varandra. Man måste också beskriva dynamiska förlopp, och detta har i projektet bara gjorts i väldigt begränsad omfattning för vissa arbetsmaskiner. Detta behöver utökas, och även innefatta hur material som asfalt förändras över tiden, t.ex. genom avsvälning eller kompaktering.
- Även om de olika delarna av informationsrepresentationen har undersökts och i viss mån testats tillsammans har inte en storskalig testning gjorts. I projektets demonstrationer användes delvis befintliga lösningar för datainsamling, och dessa tillhandahöll informationen på annat format än länkade data. En mer fullskalig implementation av hela informationskonceptet är önskvärd, där också ontologierna i större utsträckning används för planering och uppföljning i realtid.

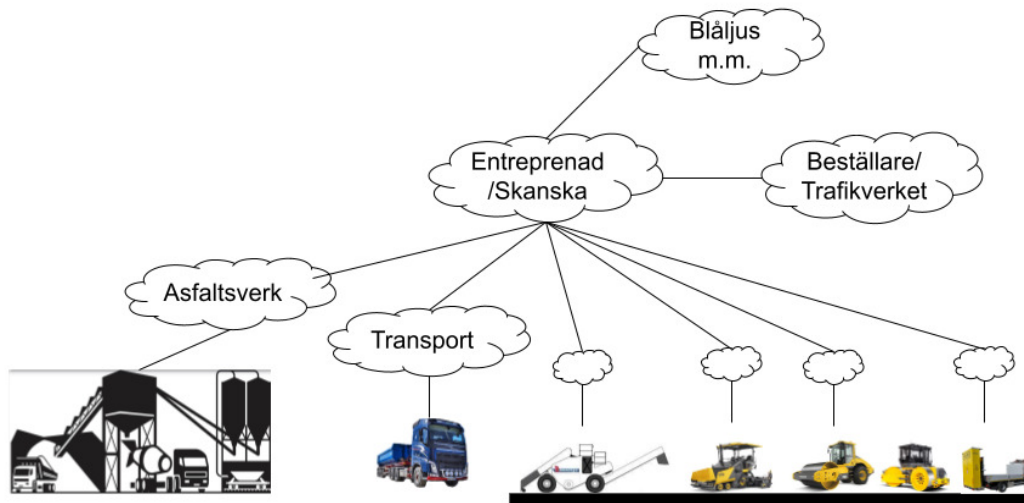
3.6. Teknikplattform

Konceptet Construction Factory baseras på att ett optimerat flöde kräver samarbete mellan olika aktörer, och då måste deras informationssystem knytas ihop genom att man skapar ett övergripande system-av-system (SoS) baserat på informations- och kommunikationsteknologi (IKT). Detta möjliggör optimering för hela processen snarare än för enskilda maskiner.

Arbetspaketet 6 i projektet fokuserar på den teknikplattform som behövs för att stödja ett heterogent SoS. Tyngdpunkten har legat på grundläggande systeminfrastrukturfrågor i situationer med många aktörer. Ovanpå detta implementerades valda koncept från Industri 4.0 och dess arkitekturmodell RAMI 4.0 (DIN, 2016).

Arbetspaketet använder resultat från AP5 kring informationsrepresentation, och har på den valda arkitekturen implementerat koncept från AP4 kring optimering i asfaltsläggningsprocessen. Dessutom har det varit ett nära samarbete med AP7 kring definition och implementation av framtagna demonstrationsscenarier för de praktiska fälttester som utfördes under hösten 2021.

Fälttester i projektet har i stora drag tekniskt handlat om integration mellan tre delsystem: Volvos fordonsdatainsamling, asfaltverkets datasystem, samt RISE testbädd för simulering av system-av-system. Den generaliserade kontexten innefattar dock fler aktörer för styrning och uppföljning på högre nivå, samt kanske även koppling till andra samhällsfunktioner, se figur 12.



Figur 12. Generaliserad IT-kontext.

3.6.1. Anpassning till RISE SoS Arena Testbed

I de föregående projekten genomfördes en del simuleringar av de grundläggande informationskoncepten, och för detta togs specialgjorda mjukvaruprototyper fram. Parallellt har RISE i projektet SoS Arena utvecklat en generisk testbädd för simulering av system-av-system. De tidigare simuleringarna har i detta projekt modifierats och är nu baserade på RISE SoS Arena Testbed, och har därmed gått från att vara en klassiskt hårt integrerad mjukvaruapplikation till en där varje delsystem separerats och implementerats som en portabel mjukvarucontainer som utnyttjar de Industri 4.0-koncept som diskuteras nedan. Detta möjliggör snabbare och enklare simuleringsutveckling och enklare anslutning av nya delsystem eller aktörer, vilket gör det möjligt att skala upp simuleringarna till allt mer komplexa scenarier.

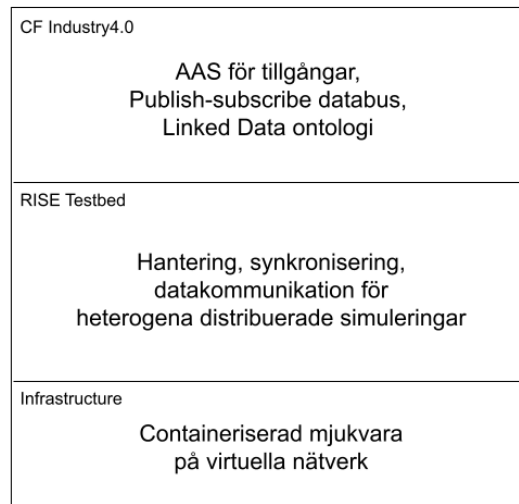
RISE SoS Arena Testbed är en plattform för simulering av system-av-system (SoS). Denna testbädd kan användas i olika livscykelfaser för ett SoS, från koncepttestning till beslutsstöd i operativa system. Målet är att stödja simulering för att titta på t.ex. effektivitet eller robusthet i tidigare utvecklingsfaser än vad som är vanligt idag. För att öka användningen av SoS-simulering vill testbädden t.ex. ta bort behov av att behöva dela simuleringmodeller mellan organisationer, ta bort eller förenkla hantering av simuleringinfrastruktur, samt minska kostnaden för att skapa och använda simuleringmodeller.

En nyckelkomponent i testbädden är ett ramverk som heter High Level Architecture (HLA; se IEEE, 2010), vilket är en standardiserad och dominerande teknik för storskaliga distribuerade realtidssimuleringar, som använts internationellt sen 1990-talet. Några viktiga funktioner hos HLA är:

- Sammankoppling av simuleringar oberoende av var de körs, OS, programspråk m.m.
- Definition av datamodeller för informationsutbyte
- Användning av publish-subscribe-mekanism för att utbyta information
- Tidssynkronisering under simuleringar

Testbädden är byggd på en teknik där mjukvara implementeras som containrar. Det ger t.ex. isolering mellan ingående delsystem, ger möjlighet att erbjuda grundbyggblock för enklare och snabbare utveckling av ett simulerat delsystem som kan delta i en gemensam simulering, och en mer effektiv IT-infrastrukturanvändning per simulerat system. Testbädden använder virtuella nätverk och separerade lagringsytor för ökad säkerhet och utvecklas för närvarande för att kunna erbjudas som molntjänst.

De olika mjukvarulagren i implementeringen av simuleringplattformen illustreras i figur 13.



Figur 13. Mjukvarulager i projektets simuleringsplattform.

3.6.2. Implementering av Industri 4.0-koncept

Implementeringen av valda koncept inom Industri 4.0 och länkade data utgör delar i det lager i teknikplattformen som knyter samman alla aktörer tekniskt. Detta illustreras i figur 3 i avsnitt 3.4.1 ovan. De nyckelkomponenter som används i projektets tolkning av Industri 4.0 är:

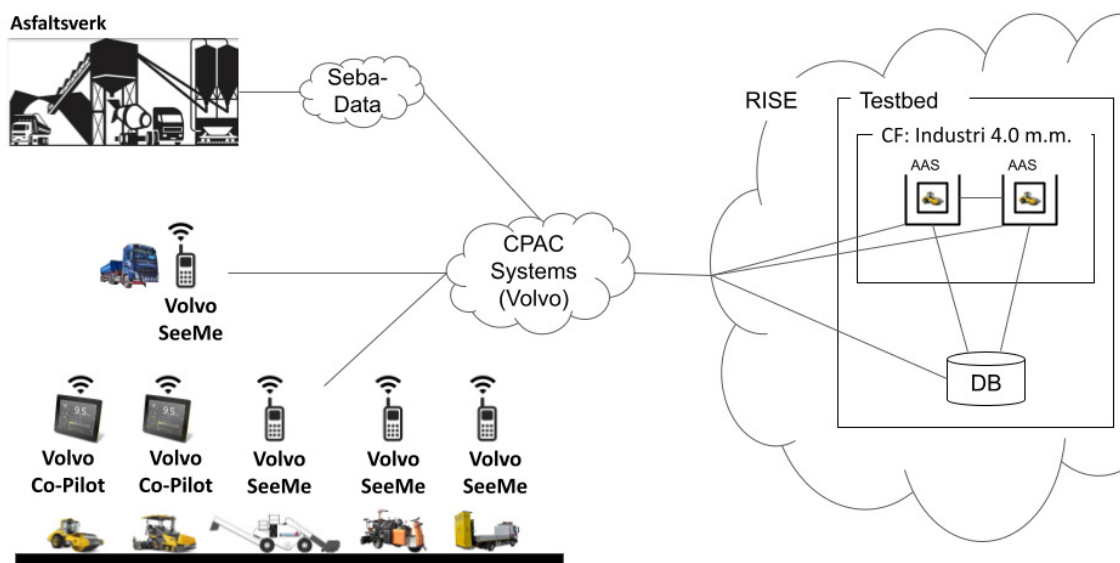
- *Asset Administration Shell (AAS)*. Erbjuder ett gemensamt gränssnitt för alla ingående delsystem, kapslar in tillgångar (som t.ex. en fysisk maskin) och ger det ett standardiserat publish-subscribe informationsgränssnitt för kommunikation mellan tillgångar. Det kan även erbjuda ett gränssnitt för en mänsklig operatör och stödjer därmed både autonoma och manuella maskiner.
- *Hierarki*. Anläggningsarbete är poly-hierarkiskt organiserat, med flera inblandade organisationer, och i projektets lösning behandlas enheter på alla nivåer som tillgångar med AAS.
- *Förmågor och undermodeller*. De olika tillgångarna beskrivs som förmågor, d.v.s. vilka tjänster de kan erbjuda (t.ex. kommunikationsteknik eller fysiskt maskinarbete). För varje förmåga finns en undermodell som implementerar den, vilket gör det modulärt.
- *Världsmodell och ontologi*. Varje delsystem i SoS:et innehåller relevant omvärldsinformation, som vi kallar dess världsmodell (WM). Informationsutbytet med andra tillgångar baseras på koncept kring länkade data. En del av världsmodellen är ontologiinformation som beskriver förhållanden mellan nyckelbegrepp.

3.6.3. Demonstratorns teknikplattform

Som en del av förberedelsearbetet inför den avslutande demonstrationen i AP7 implementerades delar av IKT-koncepten i Construction Factory i en teknikplattform. Detta gjordes i samarbete mellan CPAC Systems, som ansvarar för Volvo CE:s Co-Pilot-produkter, och RISE. I arbetet med demonstratorn behandlades främst åtkomst till maskindata, simulering, samt förberedelser och genomförande av fälttester.

Åtkomst till maskindata

Volvo Co-Pilot är en interaktiv display som levererar realtidsinformation till maskinföraren på flera olika Volvo-maskiner, och informationen överförs också till en molntjänst via mobiltelefonnätet. Data



Figur 14. Dataflöden för projektets fälttester.

i molntjänsten kan sedan kommas åt genom ett gränssnitt för applikationsprogrammerare (API) som baseras på det av Google framtagna protokollet gRPC. För detta utvecklades en klientmjukvara för teknikplattformen som kan prenumerera på och efterfråga information rörande positionering, sensordata, händelsekommentarer samt asfaltsleveranser. Detta arbete har till delar skett parallellt med CPAC:s egen utveckling av molntjänstens gränssnitt, där projektet gett kontinuerlig feedback.

Simulering

För att kunna representera demonstratorns kontext skapades simuleringsmodeller för de ingående maskinerna i enlighet med beskrivningen av Industri 4.0-koncepten ovan, samt möjlighet att smidigt kunna definiera olika konfigurationer. Detta arbete har även skett i symbios med utvecklingen av RISE SoS Arena Testbed. För de delsystemen, t.ex. fordon, från vilka det finns verkliga data att hämta, har det skapats möjlighet att både låta realtidsdata strömma direkt in i en simulering, alternativt återspela lagrade data från olika tidssekvenser per fordon, se figur 14.

Fälttester

Inför fälttesterna har en viktig komponent varit att skapa en fristående datainsamling, för användning inom projektet och förhoppningsvis i framtida projekt. Väsentlig vikt har lagts på att få den robust, då fälttester delvis skett nattetid under långa perioder, samt att arbetet kring fälttester varit krävande och insamlad data är unik i dagsläget. Till de relativt stora datamängderna har en Postgres-databas använts där originalmeddelanden lagras i sökbart JSON-format för effektiv efterbearbetning och analys. Totalt har data samlats in under ca tre veckors asfaltutläggning, där ungefär 30 timmar data har användbar kvalitet. Data från upp till 20 fordon (varierande per tillfälle) har sparats, med parametrar såsom fordonspositioner inrapporterade på sekundnivå. För mer information kring parametrar hänvisas till figur 18 i avsnitt 3.7.1 nedan.

Sparade data kan efter fälttester direkt användas för uppspelning i efterhand av ett simuleringsscenario. Ett sådant scenario beskrivs i demonstratorarbetet. Ett annat har studerats i AP4 (planering och optimering), där man på en högre nivå i Industri 4.0-hierarkin (AAS för en arbetsplats eller process) resonerar kring några deltagande maskiner (läggare och vältar) vad gäller avstånd, hastigheter och temperatur för att optimera kvalitet. Detta visas i ett implementerat användargränssnitt (se figur 15) för



Figur 15. Implementation av koncept för högre nivåns beslutsstöd.

arbetsplatsens AAS, där en graf visar läggarghastighet (övre högra kurvan i figuren) samt deltagande vältars avstånd till läggare (nedre högra kurvan).

Figuren visar verkliga data från fälttester i Bålsta under kvartal 3 2021. I det specifika fälttestet var bara en vält aktiv och då välten åker fram och tillbaka för att kompaktera asfalten bakom läggaren så uppstår det sicksack-mönster som kan ses i avståndsgrafen. När flera vältar är aktiva så syns också deras gemensamma flytande avstånds-medelvärde i avståndsgrafen, som en indikering på hur väl vältarna kan hålla samma tempo som läggaren över tid (jämför detta med Figur 6 i avsnitt 3.4.3 ovan). Vad gäller optimal vältning så representerar de olika färgade fälten i bakgrunden på grafen avsväljande asfalt, och detta skulle kunna beräknas dynamiskt från miljö- och materialsensorer alternativt mätas av vältarna.

3.6.4. Resultat

Utgångspunkten för arbetet har varit det unika i att för den valda domänen utveckla en plattform som använder koncept från Industri 4.0 och Lean-analys för att koordinera produktionen i kombination med en informationsmodell för interoperabilitet.

Projektets teknikplattform har efter hand blivit anpassad till att utnyttja RISE SoS Arena Testbed, och därmed gått från att vara en klassiskt hårt integrerad mjukvaruapplikation till en per-delsystem separerad containerbaserad simulering som utnyttjar valda Industri 4.0-koncept, vilket möjliggör snabbare och enklare simulering utveckling och enklare anslutning av nya delsystem och aktörer.

En viktig del i arbetet har varit insamling av synkroniserade data från de ingående aktörerna i fälttesterna. Detta har skett i den absoluta slutfasen av projektet och endast preliminära analyser har fått plats i ramen för detta projekt (se vidare avsnitt 3.8).

Framtida möjligheter

Med ett fungerande ramverk för SoS-simulering, finns nu goda möjligheter för utökad simulering, genom att inkludera fler komponenter, såsom asfalt, väder, geografi m.m. Med en process nedbruten i

moment kan utökningar också göras utifrån tankar och tidigare implementerade koncept för kontinuerlig planering och optimering.

Fälttesterna i projektet har haft flera aktörer inblandade, men bara en dataleverantör. SoS-perspektivet skulle belysas och bli mer intressant när Industri 4.0-lagret verkligen blir det sammanlänkande lagret för fler aktörer. Ingen realtidsanalys är gjord under fälttesterna, men i ett framtidsscenario skulle det vara högst intressant att införa beslutsstöd under pågående arbete och analysera resultat.

3.7. Demonstrator

Arbetspaketet syftar till att planera och genomföra en demonstration för att knyta ihop relevant data från olika aktörer i processen samt implementera dessa på en teknikplattform. I demonstratorn har data samlats in för att kunna genomföra analys på produktionsprocessen. Detta för att finna förbättringspotential i hur processen utfördes med avseende på produktivitet, kvalitet och miljöaspekter.

Följande delar har ingått:

- Planering av demonstrationsscenarier och fysisk demonstration
- Anpassning av resurser (anläggningsmaskiner, markområde etc.)
- Genomförande av demonstration

3.7.1. Planering av scenarier och fysisk demonstration

För att genomföra demonstratorn och få ut relevant data har åtta olika scenarier utarbetats utifrån användningsfallen (se avsnitt 3.2). Med utgångspunkt i arbetet kring Lean-analys med hjälp av arbetsplatsbesök, intervjuer och workshops, så har dessa åtta scenarier diskuterats och prioriterats ur demonstrationssynvinkel. Arbetet har sedan fortsatt i projektgemensamma workshops som syftat till att ta in synpunkter från samtliga projektdeltagare.

Projektet har haft som målsättning att ta hela värdekedjan i beräkning, från bergtäkten till kvalitetsutvärdering och den plattform som tagits fram är generisk. I demonstratorn har användarfallet begränsats av praktiska skäl till att omfatta enbart processen från asfaltverket ut till läggning av asfalt och kvalitetsutvärdering, vilket illustreras i figur 16. Utifrån detta har följande scenarier identifierats och bedömts som relevanta för demonstrationen:

1. Kompakteringsbedömning
2. Planering kompakteringsöverfarter
3. Bedömning av materialflöde från trailers
4. Läggarplanering utifrån förarbete (t.ex. justering, läggningstjocklek)
5. Förutsäga materialåtgång
6. Kvalitetsutvärdering av utlagd asfalt
7. Slutdokumentation
8. Koldioxidutvärdering

Dessa åtta scenarier analyserades sedan utifrån förutsättningarna för demonstratorn och vilka möjligheter som gavs att inhämta data, där utgångspunkten varit vilken data som skulle vara mest relevant för projektets fokus samt på vilket sätt det skulle kunna påvisas under själva demonstratorn. Genom denna analys kunde scenarierna konsolideras till fyra olika storyboards med relevans både från ett tekniskt samt ett kommunikativt perspektiv för att visa på systemets möjligheter, fördelar och även fortsatt kravställning mot olika delar av systemet.



Figur 16. Översikt över demonstrationens fokusområden.

Storyboard 1: Samarbete läggare-vält för jämn drift

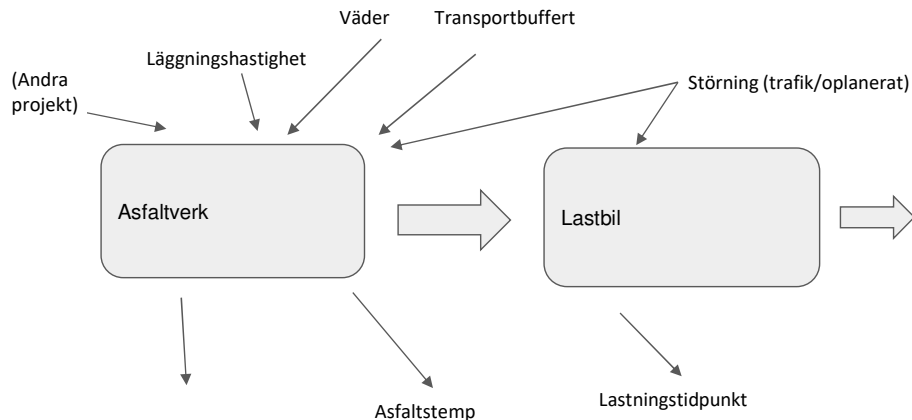
Under läggning av asfalt vill man åstadkomma ett så jämnt flöde i processen som möjligt och undvika oplanerade stopp eftersom det introducerar kvalitetsrisker. Det innebär även ökade kostnader och utsläpp när all utrustning runtomkring inte utnyttjas optimalt. För att åstadkomma detta behövs god planering av samarbetet mellan läggaren och välten för att vältningen skall ske inom rätt temperaturfönster och till rätt kompakteringsgrad. Problematiken kan sammanfattas så här:

- Om avståndet blir för långt uppstår kvalitetsproblem p.g.a. för kall asfalt, vilket medför risk för underpackning.
- Om avståndet är för kort leder detta till kvalitetsproblem p.g.a. för varm asfalt, och att vältarna håller fel hastighet.

Med läggarens status och vältastigheter som input kan läggare anpassa hastighet för att få jämn och framför allt kontinuerlig drift:

- Med information om tidpunkt för kommande asfaltleveranser kan läggaren anpassa hastighet för jämn drift, som i sin tur låter vältarna anpassa sig och åstadkomma rätt kvalitet.
- Med information om vattenåtgång och planerad påfyllning som input kan man påverka läggare och vältar att gå jämnt.

Relaterat till arbete kring produktionshastighet i AP4 samt användningsfall 2, 3 och 5 ovan, har en prototyp implementerats i RISE simulatormiljö för att ge en möjlighet till beslutsstöd på en Industri 4.0-nivå. Den påvisar möjligheterna med kvalitetshöjning med hjälp av flera digitalt samarbetande aktörer (i detta fall Volvo-läggare och -vält och samt vält från tredjepart), men i ett utökat scenario även vattenbil och transportör. Målet är att med hjälp av en samlad information kunna undvika stopp beroende på asfalttransport, vattenpåfyllning eller klisterarbete samt få vältning vid rätt temperatur. Prototypen visar på det dynamiska medelavståndet mellan vältar och läggare, samt visar asfaltstemperatur beroende på avstånd från läggare.



Figur 17. Schematisk översikt över demonstrationens fokusområden.

Storyboard 2: Asfaltlogistik

Under transporten av asfaltmassa från asfaltverket, via lastbilen till läggaren på arbetsplatsen samt slutligen till färdig asfalt på vägen, kan många olika faktorer påverka, vilket visas i figur 17. Detta kan leda till störningar i driften där processen kan behöva justeras för optimal produktivitet, kvalitet och miljöpåverkan. Ur ett systemperspektiv kan detta ses som ett antal olika in- och utvariabler som med ett system för beslutsstöd och optimering skulle kunna styras på ett kontrollerat sätt till skillnad från idag då allt sker erfarenhetsbaserat.

Storyboard 3: Digital dokumentation

I dagsläget sker en stor del av all dokumentation runt asfaltutläggningsprocessen med manuella metoder, pappershantering samt schablonuppskattningar.

Med en digitaliserad process, där både materialflöden och produktionsdata kan spåras, skulle merparten av all pappershantering och manuella inslag kunna elimineras, vilket ger ett antal fördelar:

- Minimera pappershantering, mindre tid för att färdigställa dokumentation - ökad produktivitet.
- Kvalitetsuppföljning - ökad noggrannhet och precision av data, undvika personal på vägen vid kvalitetstestning. Data tillgänglig direkt för beslutsfattande.
- Klimatpåverkan - optimera kvalitet efter satta mål och dokumentera. Faktiska uppmätta värden möjliggör mer tillförlitlig uppföljning. Gå från generiska värden till faktiska.
- Logistik - klar bild av transportaktivitet.
- Kontinuerliga data ger möjlighet till att applicera Lean-tänk och följa upp produktionen.

Storyboard 4: Assets livscyklar i systemet (visionärt)

Genom att applicera projektets övergripande vision i flera led med spårbarhet på både det hanterade materialet, produktionsmaskinerna och den färdiga produkten så ger detta möjlighet att förbättra processen.

För att exemplifiera detta i asfaltsprocessen så påverkar materialet som läggs ut förslitningen på läggarens skridplåtar. Med spårbarhet på vilket material som passerat genom läggaren så skulle det möjliggöra att mer precist arbeta med förebyggande underhåll på maskinen. Produktionsdata skulle då kunna utgöra underlag för uppskattning av slitage och planering av underhållsåtgärder.

Storyboard 4 syftar till att kommunicera framtida möjligheter med denna typ av system och är inte direkt kopplat till arbetet med demonstratorn i detta projekt. En utveckling i denna riktning, kombinerat med digitala tvillinger, möjliggör dock denna typ av systemlivscykel.

<p>Positionering (alla fordon)</p> <ul style="list-style-type: none"> • timestamp • position • speed • direction <p>(co-pilots med korrektion)</p>	<p>Väldata (vält)</p> <ul style="list-style-type: none"> • timestamp • position • density • temperature • cmv • drum width 	<p>Läggingsdata (läggare)</p> <ul style="list-style-type: none"> • timestamp • position • temperature array • fuel consumption • ambient temp • wind direction • avg spread rate 	<p>Manuella kommentarer (läggare)</p> <ul style="list-style-type: none"> • timestamp • comment • paved distance
<p>Följesedel asfalt (asfaltsverk/transportör)</p> <ul style="list-style-type: none"> • timestamp • plant id • ticket id • truck id • material name • material weight • gross weight • material temp • status • claimed by 	<p>Fordonsdata (alla fordon)</p> <ul style="list-style-type: none"> • model • serial number • name • type • sub type 		

Figur 18. Databehov i demonstratorn.

Databehov

Kopplat till scenarierna har arbetspaketet tagit fram en matris med databehov från de olika aktörerna i processen. Här har Volvo CE sedan samarbetat med underleverantören CPAC Systems för att tillgängliggöra data för projektet och för att kunna strömma realtidsdata via mobilnätet. De viktigaste parametrarna hos olika tillgångar sammanfattas i figur 18.

Planering av demonstrationsobjekt

Planeringen av demonstratorn innefattade även att hitta lämpliga objekt där Skanska agerade entreprenör och där Trafikverket agerade beställare. Beslut togs under våren 2021 att köra demonstratorn på Skanskas omläggning av E18 utanför Täby, Stockholm under hösten 2021. Under utvecklingsperioden beslutades även att behov fanns av att köra en generalrepetition under mindre tidspressade former och beslut togs då att göra detta på en asfaltutläggning på ett industriområde i Bålsta, Stockholm, tidigare under hösten 2021.

Utöver att hitta rätt objekt för demonstrationen behövde det säkerställas att alla nödvändiga resurser fanns på plats, såsom:

- Hitta fordon och arbetslag för rätt tidpunkt/projekt
- Organisera teknik både för Volvos integrerade produkter, men även externa aktörer såsom asfalttransportörer
- Stöd under genomförande, t.ex. uppdateringar, montage, på-platsen-stöd för teknik-buggar
- Utföra datainsamling

3.7.2. Anpassning av resurser

De befintliga maskiner och andra resurser som används i produktion idag är bara delvis anpassade för datainsamling, och bakomliggande IT-system är inte heller fullt ut anpassade för realtidsdata. Därför behövde olika anpassningar göras både av datainsamling och fysiskt på maskinerna.

Datainsamling

I projektet har datainsamling möjliggjorts genom integrering av flera olika befintliga system, för att tillhandahålla viktiga produktionsdata samt andra tekniska och geografiska parametrar. För att skapa

Antal	Utrustning/Material	Antal	Utrustning/Material
10	Samsung Galaxy A21 Mobiltelefoner med SeeMe Appen	1	Co-Pilot Med Modifierad PaveAssist
3	Samsung Galaxy Tab A3 med SeeMe appen	1	Co-Pilot med Modifierad Compact Assist
8	Samsung Mobiltelefoner äldre lånade av VolvoIT. SeeMe appen	1	GNSS Antenn - GPS Antenn till Co-Piloten till tredjeparts vält.
18	Mobilabonnemang med data	1	Specialkablage för matning och GNSS antennkabel till Co-Pilot - Används för anslutning av Co-Pilot till tredjeparts vält
3	Surf abonnemang		
		1	USB 4G Modem - Används till CO-Pilot för att få 4G Täckning
10	Powerbanks 10000mAh		
10	12V USB Laddare 2,4A		USB B->USB C Kablar
			230V USB Laddare
1	Basfäste med AMPS-hålbild Ram - Används för att fästa Co-Pilot på tredjepartsmaskin	4	Plastburkar med tätslutandelock - Används för att fästa mobil med powerbank på maskiner/utrustning som inte har väderskydd/hytt.
1	Arm till kulle Ram Mounts		Skumplast, Silvertelj, buntband, kardborreband och diverse verktyg
1	Bygelmontering för rör, Ram Mounts		

Figur 19. Utrustning i demonstratorn.

förutsättningar för insamling av data, har ett nära samarbete med Volvos underleverantör CPAC Systems skapats, dels för att kunna utveckla stöd för projektets databehov, dels för att kunna extrahera relevanta data. Teknikplattformen för denna dataextraktion beskrivs närmare i avsnitt 3.6 ovan, och den utgör en förutsättning för senare analys och simulering av data.

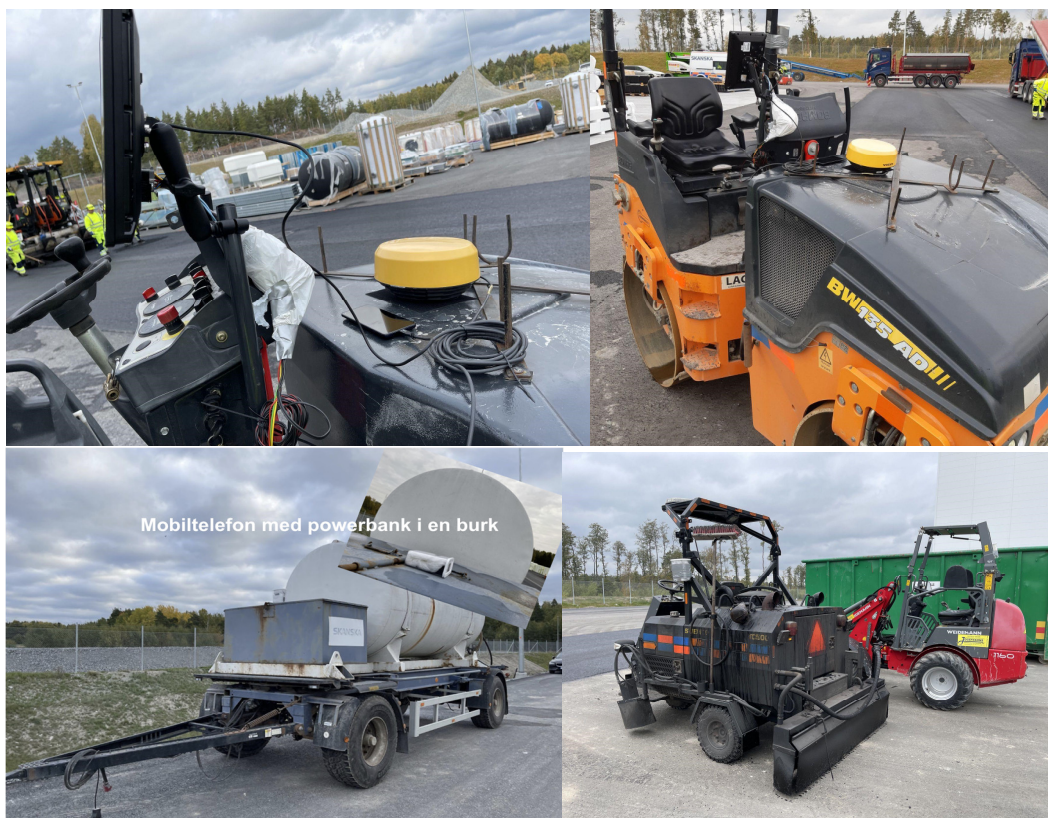
Utöver fordonsdata har även integration mot asfaltverk införts för att digitalt hantera data från tillverkningsprocessen genom Skanskas underleverantör Seba-Data. I dagsläget överförs denna data via manuella papperskvitton, s.k. asfalts-kvitton, som levereras ut till arbetsplatsen med varje lastbil, men projektet har visat på möjligheten att digitalisera detta informationsflöde.

En intressant parameter som skulle möjliggöra ytterligare förbättrad kvalitetsutvärdering av den färdiga asfalten är detaljerad temperaturdata från vältarna i samband med vältning. För att möjliggöra detta inleddes arbete med att utrusta de enskilda vältarna med värmekamera. Genom att kombinera detaljerade temperaturdata med kompakteringsdata skulle förbättrade och yttäckande kvalitetsmått kunna introduceras. I förlängningen skulle systemet kunna användas för att eliminera förstörande provning. Ett sådant system skulle även kunna användas för att positionera välten på den heta ytan och på så sätt möjliggöra automation av vältningsprocessen. Installationen av värmekameran var dock mer omfattande än förväntat och kunde inte realiseras i tid för demon.

Demoutrustning

För att möjliggöra datainsamling från olika enheter behövdes en omfattande mängd utrustning monteras och anslutas (se sammanställning i figur 19). Den monterades på olika sätt i olika maskiner, enligt följande:

- *Lastbilar.* Varje lastbil för asfaltstransport utrustades med en mobil innehållande appen SeeMe. Varje lastbil registrerades via registreringsnumret och anslöts till projektets testområde i Rock2Road-systemet.
- *Läggare.* Den primära läggaren var utrustad med Co-Pilot och en uppdaterad version av Volvos PaveAssist för insamling av mätdata. Co-Piloten registrerades och anslöts till projektets testsite i Rock2Road.
- *Vältar.* I Bålsta användes en Volvo DD115 utrustad med Co-Pilot och med en testversion av Compact Assist anpassad för datainsamling. På tredjepartsvälten Bomag monterades en standalone Co-Pilot (med testversionen av Compact Assist) som användes för att registrera antalet överfarter på ytan samt rapportera position. På E18 i Täby användes Dynapacs vält



Figur 20. Exempel på montering av utrustning i olika maskiner.

utrustad med Volvos Co-Pilot med Compact Assist, testversionen som registrerade överfarter och position. Den andra vältan utrustades med mobil och SeeMe-appen för positionsspårning.

- *Övriga:* På hjullastare, vattentank och klistermoppe användes mobil med SeeMe-appen för positionsspårning.

Exempel på monteringar visas i figur 20.

Datainsamling på arbetsplatserna

Samtliga datainsamlingsenheter, Co-Piloter och mobiler med SeeMe-appen registrerades och anslöts till projektets test-site i Rock2Road. Lastbilarnas registreringsnummer registrerades i SeeMe-appen för att möjliggöra koppling mellan lastbil och kvitto från asfaltverket. Registreringsnumret presenteras i läggarens Co-Pilot med beräknad ETA (Estimated Time of Arrival)

I Rock2Road definieras ett geostängslat område för asfaltverket och ett område runt läggaren. Området för asfaltverket representerar det ställe där lastbilen lastas med asfalt och vägs in med lastad mängd och får ett digitalt och fysiskt kvitto på leveransen. Området runt läggaren representerar det ställe där lastbilar lastar av asfaltmassan i tråget på läggaren och den fysiska samt digitala vågsedelns levereras och accepteras.

3.7.3. Genomförande av demonstration

Målet med demonstrationen var dels att validera att projektets övergripande koncept fungerar, och skaffa praktiska erfarenheter som grund för ytterligare förbättra det; och dels att samla in operativa data från olika tillgångar (maskiner) för att möjliggöra analyser av asfaltutläggningsprocessen med avseende på bl.a. Lean.

Det utfördes två olika typer av demonstrationer i projektet. Den första utfördes på dagtid utanför Dagabs nya lagercentral i Bålsta. Här fanns det goda möjligheter för projektet att få testa systemet i riktig miljö, och finslipa den tekniska lösningen för att göra den mer robust. Den här testen var helt avgörande för att kunna genomföra den skarpare demonstrationen på E18 utanför Täby där Trafikverket var beställare. E18-jobbet utfördes nattetid och i en miljö som gjorde att de operativa kraven på systemet var ovanligt stort för att vara en test inom ramen för ett FoU-projekt.

Återkoppling och erfarenheter från deltagande parter

Under förberedelser och genomförande av demonstratorer samlades mycket erfarenheter in, både från projektets deltagare och den operativa personal som kom i kontakt med systemen.

Från Skanskas sida, i rollen som entreprenör, inhämtades synpunkter från såväl läggjarlaget på vägen, arbetsledningen, asfaltverket, och transportörer:

- Arbetslag på vägen:
 - Information om förväntad ankomsttid för asfaltleveranser (ETA) bidrar till förbättrad planering av utläggningsprocessen och minimerar oplanerade stopp.
 - Digital kvittohantering effektiviserar masshanteringen och ökar säkerheten kring arbetsmiljö då manuell vågsedel inte behöver samlas in.
 - Yttäckande kvalitetsdata bidrar till homogenare packning och jämnare kvalitet.
 - Insamling om data från hela processen bidrar till utökade produktionsdata för ökad kunskap om processen samt potentiella förbättringar.
- Arbetsledning:
 - Möjlighet till loggning av händelser i processen för uppföljning.
 - Digital uppföljning av materielmängd istället för manuell inmätning.
 - Enklare dokumentation av utfört arbete.
- Asfaltverk (inklusive underleverantören Seba-Data):
 - Digital vågsedelhantering ger säkrare informationsöverföring och bättre spårbarhet.
- Transportör:
 - Personlig integritet en utmaning för framtiden.
 - Förbättrad arbetsmiljö då vågsedel inte behöver hämtas vid fordon.
 - Hanteringen av mobiltelefoner behöver förenklas.

Från Volvo CE som maskinleverantör (inklusive deras underleverantör CPAC) var följande erfarenheter viktiga:

- Support och servicepersonal dygnet runt samt tillgång till arbetsplats viktigt för fortsatt utveckling.
- Uppkopplingens kvalitet är avgörande för systemets funktion.
- Support för tredjepartsmaskiner och utrustning kräver en standard.

Områden för vidareutveckling

Demonstratorerna har också bidragit till att identifiera ett antal områden där förbättringar behövs. Dessa presenteras nedan i relation till de olika resurstyperna.

- IT-system för datainsamling:
 - Övervaka och diagnostisera systemets funktion.
 - Robusthet gällande att klara fel i systemet, t.ex. tappad kommunikation med någon utrustning.
 - Stödja tredjepartsmaskiner och -utrustning, vilket kommer att kräva en standard eller påbyggnadsutrustning.
 - Förenklad eller automatiserad anslutning till en anläggningsarbetsplats för fordon och maskiner. Kan arbetsorder t.ex. innehålla den informationen?
 - Schemaläggning och styrning av lastbilstransporter för att styra processen effektivare.

- Tvåvägskommunikation mellan olika maskiner och fordon.
- Loggning av klimatdata.
- Uppkoppling:
 - Robustare och mer tillförlitlig uppkoppling.
 - Bättre diagnostisering och felhantering vid uppkopplingsproblem.
 - Stöd för underjordsarbete, vilket kräver annan typ av kommunikation och positionering.
- Läggare:
 - Påkalla nästa lastbil.
 - Hanteringen av flera läggare på samma site.
 - Definition av geostängsel kring läggaren för att öka säkerheten kring tidmätning för olika processtillstånd.
- Vält:
 - Utbyte av kompakteringsinformationen mellan vältarna.
 - Information om asfaltens aktuella temperatur för att bättre styra kompakteringen så att den görs inom korrekt temperaturintervall.
- Lastbilar:
 - Förenkla hanteringen med mobiler och appar, om möjligt via lastbilarnas telematiksystem.
 - Navigeringshjälp till och från arbetsplats och asfaltverk, inklusive positioner för lastning, avlastning och väntan.
 - Information om t.ex. koder för grindar.
 - Loggning av bränsleförbrukning för redovisning av klimatpåverkan.
- Våg:
 - Separera vikt på dragbil, släp och kassetter.
 - Möjligheter att vågen automatiskt ansluter en lastbil till en arbetsplats via t.ex. kvittot eller vägningsprocessen.
- Asfaltverk:
 - Temperaturmätning av asfalten vid lastning på lastbil.

3.7.4. Resultat

Demonstratorn på E18 Täby samt generalrepetitionen i Bålsta resulterade i insamlandet av ett femtiotal parametrar under ca tre veckors arbete. Totalt för både arbetena loggades sammanlagt ca en veckas körning som användbara data. Skillnaden mellan drifttid och mängden loggade data består bl.a. i uppstarteffekter samt i diverse driftstörningar, både i processen som sådan samt i det utvecklade systemet. Bl.a. inträffade materialbrist, positioneringsproblematik relaterat till mobiltäckning samt systemproblematik, både i de anpassningar projektet gjort samt hos tredje part.

Körningarna resulterade i detaljerad återkoppling från olika aktörer i processen på hur systemet fungerar, vilken typ av förbättringar som önskas, vilka funktioner som ger mervärde och vilken typ av information som skulle vara önskvärd i framtida implementationer. Projektets övergripande syfte, att bidra till förbättringar inom produktivitet, kvalitet och klimatpåverkan fanns med i flertalet punkter av återkopplingen och dessutom förbättringar kopplade till uppföljning och arbetsmiljö.

Några av de viktigaste lärdomarna innefattar behovet av robusthet, både i systemet samt i datakommunikationen. Ökad tillgång till realtidsdata ledet till förbättrad processförståelse samt ökad produktivitet, säkrad kvalitet samt lägre klimatpåverkan. Vidare medför systemet en kontrollerad samt säkrare arbetsmiljö. Dessutom bidrar systemet till ökad spårbarhet samt uppföljning av processen för branschens olika aktörer.

Slutligen har demonstrationerna visat att det finns en stor potential att samla in relevant data från olika aktörer i asfaltprocessen för vidare analys, högre produktivitet, jämnare kvalitet, mindre klimatpåverkan samt förbättrad dokumentation.

3.8. Effektvalidering

Effektvalidering kan beskrivas som en strukturerad bedömning och värdering av kunskaper och kompetenser som är en effekt av arbetet som utförts i projektet. Framst avser arbetet den analys och simulering av insamlade data och de beteenden och egenskaper som identifierats. Kunskaper har också genererats genom aktiviteterna som utförts i projektet och de lärdomar som det inkluderar.

Utvärderingen av effekter har skett genom främst kvantitativa studier av insamlade data. Metoden för kvantitativ datainsamling bygger på att samla in adekvat data från relevanta maskiner och fordon samt infrastruktur med hög upplösning. Data för studien har tillgängliggjorts dels genom tidigare arbete på Volvo där data från bergtäkter samlats in, samt dels genom den data som samlats in genom demonstrationerna som utförts i projektet.

Syftet här är att visa att det inte bara är tekniskt möjligt att realisera konceptet, utan också utvärdera hur stora effekter det kan ge i form av produktivitet och miljöpåverkan. Identifierade direkta produktivitetsförbättringar innehåller minskad administration i form av reducerat behov av manuell rapportering och uppföljning; minskade antal avbrott; minskade slöseri (t.ex. väntetider, buffertar och lager); samt ökad nyttjandegrad av maskiner genom bättre kontroll på flödet. Indirekt minskar också CO₂-utsläpp och energikonsumtion genom att färre avbrott ger högre kvalitet på lagd asfalt vilket ökar livslängden. Ökad livslängd gör att underhåll minskar vilket medför att mindre arbete krävs över livslängden på lagd asfalt.

3.8.1. Analys av värdeflödet i asfaltutläggning

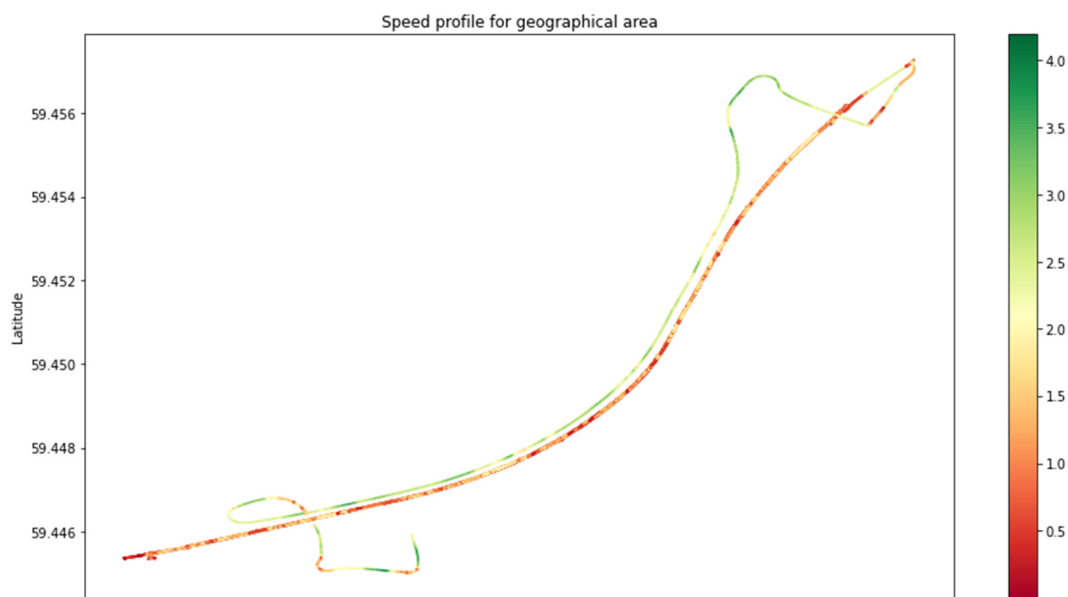
I projektets demonstrator så samlades data in från ett stort antal maskiner och fordon som används för anläggandet av asfalt. Data från läggare, kompaktorer, vattentankbil, klistermoppe samt lastbilar och asfaltverk ingår.

Övergripande så har vi inom ramen för projektet analyserat data från två verksamheter för asfaltutläggning. Analysen har nyttjat data från totalt fem tillfällen under ca 30 timmar som samlats in och analyserats. På grund av att datainsamlingen skedde sent i projektet har inte all data som samlats in hunnit analyseras.

Under de timmar som hittills analyserats så rapporterade operatören av läggaren totalt åtta avvikelser av typ ”väntar på material”. Detta indikerar att inflödet av material är lägre än utflödet av lagd asfalt. Konsekvensen av brist på material är att asfaltsläggaren får stanna och vänta in material. Stopp av asfaltsläggare genererar vanligtvis en oönskad skarv i lagd asfalt, och skarvar har generellt lägre kvalitet än övrig lagd asfalt. Sådana skarvar genererar därmed ökat underhåll och risk för att asfaltens livslängd blir kortare. Att underhålla och lägga ny asfalt flera år tidigare än beräknat är en stor kostnad för samhället. Det förbrukar stora mängder energi och leder till utsläpp som om möjligt kan undvikas genom att antalet oplanerade stopp minimeras.

Figur 21 visar de olika maskinernas hastighetsprofil på olika geografiska positioner vid asfaltutläggning i Täby, och man kan se att hastigheten för läggningen varierar över tid. Själva konsumtionen av asfalt påverkas dock inte enbart av läggarens hastighet utan också av vilken bredd och tjocklek som läggs. Utifrån figuren kan man ändå anta att det finns en variation i hastigheten som asfalt konsumeras.

Vid utlastning från asfaltverket så registreras vikten för varje lass. Normalt är detta ett papperskvitto som föraren av lastbilen tar med till asfaltsläggaren. I detta projekt har en digital integration mot



Figur 21. Hastighetsprofil från asfaltutläggningsmaskiner under projektets demonstration i Täby.

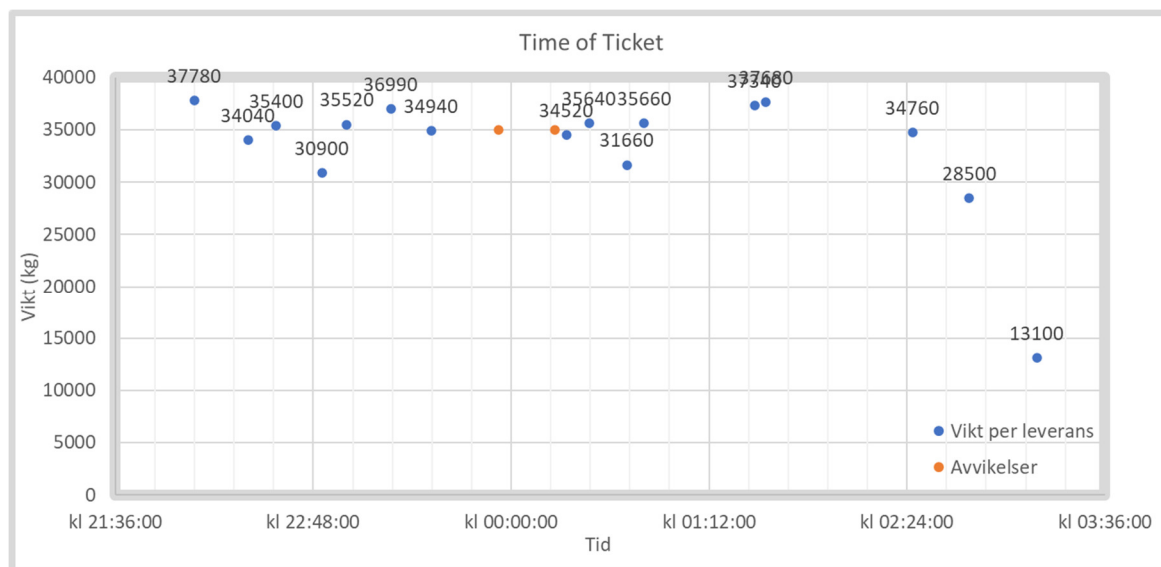
asfaltverket implementerats och demonstrerats. När lastbilen anländer till anläggningsplatsen och påbörjar avlastning genereras ett digitalt kvitto av läggaren. Detta kvitto får ett datum och tidsstämpel vilket inkluderar mängden massa.

Figur 22 visar en graf för varje kvitto genom dess tidpunkt och vikt som lastas av. I samma graf visas också när avvikelserna av typ ”väntar på material” registreras. Utifrån detta kan man se att mediantiden mellan leveranserna enligt kvittona var ca 16 min (med en standardavvikelse på ca 15 min och en maxtid på ca 53 min). Eftersom sju lastbilar användes för utleveranserna så behöver lastbilarna ha en cykeltid på högst 96 min (1h och 36 min) för att den första lastbilen ska hinna tillbaka inom 16 min efter att den sista av de sju har lämnat.

Man kan också konstatera att mängden asfalt i transporterna varierar över tid och vid detaljstyrning av läggningen bör lastvikten inkluderas i beräkningen då skillnaden i massamängd mellan min och max är över 20% för de transporter som analyserats.

Vid analys av transportprocessens aktiviteter kan vi se att väntetider och den mest relevanta variationen av aktivitetstider är vid avlastningen. Vid avlastningen finns det troligen mer att hantera vid en framtida djupare analys och optimering av metoden för framkörning. Vi ser i denna data att olika ruttor används och väntetider på olika platser. Orsaker och konsekvenser har inte ytterligare analyserats inom ramen för detta projekt. Dock kan vi konstatera att cykeltiderna för transporterna för ovan analyserade tillfälle låg på medianen 2h och 7 min. Detta är väsentligt längre än taktiden som behövs baserat på läggarens hastighet, och således bör det bli brist på material. Figur 22 visar också att avvikelserna för brist på material sker precis efter att den sista av de sju lastbilarna har levererat sitt material och att den första inte hinner tillbaka innan materialet är slut.

För att undvika denna typ av avvikelse som både påverkar kvalitet, produktivitet, livslängd och CO₂-utsläpp negativt föreslår vi två typer av styrmedel. Dels kan operativa åtgärder implementeras där de olika processernas takt styrs. Om cykeltiderna för lastbilarna inte kan sänkas behöver läggarens takt höjas så att den matchar flödet av material. Ett annat alternativ är att addera en eller två lastbilar till flödet. Utifrån vår analys av flödet går det sannolikt att upptäcka taktskillnaden mellan processerna så fort den andra lastbilen har lämnat sitt material då tillräckliga data finns för att beräkna taktiden för läggaren samt leveranserna med lastbilar.



Figur 22. Tid och lastvikt för kvitton samt tid för avvikelser.

3.8.2. Analys av transporter i dagbrott och bergtäkter

Utöver dataanalysen från demonstratorn har data analyserats från dagbrott och bergtäktsverksamhet. Dessa verksamheter var i fokus för tidigare projekt under paraplyet Construction Factory, och därmed fanns även data tillgänglig för analys. En mer detaljerad analys har gjorts av de cykliska transporterna som utförs av dumprar, och regressionsmodeller av maskinerna togs fram som kan användas för att predicera hur olika körsätt påverkar bränsleförbrukningen. Då blir det också möjligt att finna rätt balans mellan produktivitet och bränsleåtgång, och därmed indirekt CO₂-utsläpp.

Flera resultat kom fram för den konkreta verksamheten där datainsamlingen skedde: bl.a. att ett stopp (för t.ex. mötande fordon på en trång sektor) per transportcykel i genomsnitt påverkade den totala bränslekonsumtionen med knappt 2%. Man kunde också se att skillnader i olika förarens hastighetsprofil kunde ge så stora skillnader som 10% i bränsleförbrukning. Samtidigt finns stora stokastiska fluktuationer i hur lång tid det tar att utföra olika aktiviteter, och detta understryker behovet att kunna styra produktionen i realtid. Mer resultat från analys av cykliska transporter i bergtäkt finns redovisade av Rylander (2021).

3.8.3. Resultat

Effektvalideringen visar att informationsutbyte i ett system-av-system, där olika aktörer med system som idag normalt inte är digitalt sammankopplade, kan öka produktivitet, minska miljöpåverkan och öka kvaliteten. Detta uppnås främst genom att minska operativa slöseri, minska avbrott, minska miljöpåverkan genom ökad livslängd och kvalitet på lagd asfalt och bättre och effektivare nyttjande av maskiner och fordon. Angreppssättet inkluderar att takta de olika processerna genom ökad kontroll och informationsutbyte. Givet de kontinuerliga förändringar som sker i processerna är det nödvändigt med realtidsstyrning baserat på insamlade data, vilket tydligt visas i både analyserna av asfaltutläggning och bergtäkt.

3.9. Resultatspridning

Syftet med arbetspaket 9 har varit att kommunicera projektets resultat i olika sammanhang. Arbetet har organiserats av en arbetsgrupp bestående av kommunikatörer från deltagande parter i projektet. Projektets externa kommunikation har haft följande huvudsakliga målgrupper:

- Anläggningsbranschen
- Forskarsamhället inom området system-av-system
- Relevanta myndigheter och finansiärer

För att sprida information om projektet och dess resultat inom anläggningsbranschen och finansiärer hölls en gemensam workshop med det strategiska innovationsprogrammet InfraSweden2030. Syftet med workshopen var att utbyta kunskap och få inblick i andra relaterade projekt. Projektet har även presenteras under Transportforum i januari 2021. Forumet hölls dock digitalt på grund av pandemin.

Projektet har haft en artikel i nyhetsbrevet för det strategiska innovationsprogrammet PiiA med syfte att sprida projektet till närliggande relevanta branscher. Projektet har publicerat fem vetenskapliga artiklar, varav en tidskriftsartikel och fyra konferensbidrag. Projektet har även delvis finansierat en doktorand som disputerat i mitten av december 2021. De vetenskapliga bidragen detaljeras i Bilaga 2. Utöver detta finns underlag för flera ytterligare publikationer som kommer att färdigställas efter projektet.

För att skapa en tydligare bransch- och myndighetsdialog planerar projektet ett öppet evenemang under mars 2022. Syftet med evenemanget är att presentera möjligheterna med konceptet Construction Factory och samtidigt få inblick i andra relaterade projekt. Evenemanget kommer förhoppningsvis resultera i konkreta förslag på hur vi kan jobba vidare med att nå en mer effektiv och hållbar anläggningsindustri.

I samband med demonstrationen spelades också ett omfattande videomaterial in. Detta kommer att användas för att sammanställa en informationsfilm om projektet och dess resultat. Den planeras att bli färdig innan ovanstående evenemang.

4. Tänkbara fortsättningar

Det här projektet har på olika sätt väsentligt ökat kunskapen om hur anläggningsproduktion kan digitaliseras med syfte att öka dess effektivitet. Detta innefattar både mer teoretisk kunskap kring hur informationssystemen ska byggas upp, såväl som praktiska erfarenheter från de omfattande demonstrationerna. I takt med att kunskapen ökar får man också insikter om nya frågor som behöver behandlas. Det här kapitlet sammanfattar ett antal områden som har diskuterats inom projektet, och där ytterligare fördjupningar behövs. Hur man rent praktiskt kan fortsätta arbetet tas sedan upp i nästa kapitel.

4.1. Klimat och miljö

Under projektets gång har klimatfrågan och kopplingen till reducereing av koldioxid blivit allt viktigare. Bygg- och anläggningsbranschen har själva tagit fram en färdplan med målet att till år 2030 minska utsläppen av växthusgaser med 50% jämfört med 2015 års nivå (Byggföretagen, 2018). Bergmaterialindustrin har samma mål i sin motsvarande färdplan (SBMI, 2019). Digitalisering lyfts fram som ett av många medel, och digitaliseringen kan antas vara speciellt viktig för åtminstone följande medel som anges i båda färdplanerna:

- Elektrifiering och effektivisering av produktionsprocesser
- Effektivare processer
- Ökad återanvändning och återvinning
- Optimering ur ett livscykelperspektiv

Elektrifiering, och även användning av förnybara energilag, är något som återkommer i de flesta färdplaner som olika branscher har tagit fram de senaste åren. Summerar man dessa är det dock ganska tydligt att tillgången på el och förnybara bränslen knappast kommer att räcka. En konsekvens av detta blir att energieffektivisering är absolut nödvändigt även i elektrifierad verksamhet. Samtidigt behöver man räkna med ökande energikostnader i en bristsituation, och om inte andra kostnadseffektiviseringar samtidigt görs så kommer anläggningsproduktionen att bli dyrare. Det krävs med andra ord ett systemtänkande där helheten beaktas för att fatta vettiga beslut kring energianvändningen.

För att kunna styra verksamheten mot mindre klimatpåverkan behövs tillgång till data från produktionen, både i realtid för löpande optimeringar, och i efterhand för organisatoriskt lärande, för planering av kommande verksamhet, och för redovisning mot beställare. Det generella koncept som tagits fram för Construction Factory kan stödja denna typ av data. Däremot har det inte varit möjligt att samla in data om bränsleförbrukning från maskinerna i demonstrationerna. Förutom bränsleförbrukning behöver man också veta vilken typ av bränsle som används, och fullödiga miljöanalyser kräver ännu mer information om hur energin har producerats, t.ex. om elen kommer från hållbar produktion.

Potentialen i återvinning av material bör vara stor, och i många länder är stenmaterial också en bristvara vilket leder till både höga priser och långväga transporter som i sig bidrar till klimatpåverkan. Återvinning kräver dock kunskap om materialets kvalitet, och det blir då viktigt att både dokumentera vilket material som använts på en viss del av en anläggning, såväl som att tillse att denna dokumentation finns tillgänglig många decennier senare när återvinning kan bli aktuellt. För att detta ska fungera krävs både stabila standarder för hur maskinläsbara data ska lagras, såväl som tydliggjorda organisatoriska ansvar för lagring.

4.2. Kvalitet och kostnader ur ett livscykelperspektiv

Klimatutmaningen betraktas med rätta som akut, och ambitionen att halvera koldioxidpåverkan inom anläggningsindustrin på ganska kort tid sätter fokus på produktionsfasen. Samtidigt behövs ett längre tidsperspektiv, där man också betraktar en anläggnings hela livscykel. Om man kan förlänga livslängden på en anläggning leder detta automatiskt till en totalt lägre mängd produktionsinsatser, och därmed mindre växthusgaser. Avgörande för livslängden är kvaliteten på vägen, och ökad kvalitet har även andra positiva effekter, t.ex. färre trafikstörningar och högre säkerhet.

För att uppnå ökad kvalitet så behöver man även här tillgång till mer och bättre data. Traditionellt är datainsamlingen manuell, och görs genom borrhov i den färdiga vägen. Detta medför dock att upptäckta brister i kvaliteten är svåra att åtgärda då vägen redan är färdig, och man får också ett väldigt litet antal datapunkter. Demonstrationerna i projektet har påvisat andra möjligheter att mäta kvalitet, genom data om den specifika asfalt som har lagts på varje del av ytan, vilken temperatur den hade, väderomständigheterna vid läggningen, och hur den har bearbetats av vältar. Genom att använda denna data bör det vara möjligt att skatta kvaliteten i varje punkt av vägen i realtid. Därmed finns också möjligheter att styra produktionen mot kvalitet och också ge beställaren ett heltäckande underlag som grund för framtida underhållsarbeten och för miljöproduktdeklarationer (Environmental Product Data, EPD).

4.3. Upphandling och finansiering

De flesta vägbyggen i Sverige har offentliga aktörer som huvudmän, antingen Trafikverket för det nationella nätverket, eller kommuner för lokala gator och leder. Upphandlingen sker på en konkurrensutsatt marknad, där marginalerna är små för entreprenörer och detta leder till en kostnadspressad situation där anbud tenderar att uppfylla uppställda krav, men inte mer, till lägsta initiala kostnad. Både klimat, kvalitet och livscykelkostnad kommer därför inte förbättras om inte tydliga krav ställs på detta i upphandlingarna, och incitament behöver skapas som ger utrymme för anläggningsbranschen att ytterligare skynda på omställningen mot lägre klimatpåverkan.

Offentliga upphandlingar förväntas vara transparenta. Kravställningen ska vara objektiv och uppfyllandet mätbart eller beräkningsbart med ett bedömningssystem som är specificerat i förväg. Dock har sättet att bedöma resultatet stor påverkan på hur arbetet görs, och därför behöver alternativa sätt att mäta kvalitet möjliggöras, t.ex. med användning av maskindata istället för fysisk provning, enligt vad som diskuterats ovan. Det behövs likaså sätt att skapa incitament för entreprenörer att nå längre både vad gäller klimat och livscykelkostnad, och där krävs andra angreppssätt än förutbestämda kravnivåer, som gör att man kan vinna en upphandling på annat sätt än lägsta pris. Likaså behöver mätsystem eller analysmetoder för klimatpåverkan och livscykelkostnad tas fram eller förfinas.

I andra länder arbetar man framgångsrikt med funktionsentreprenad, där entreprenören tar ansvar för vägen under dess tänkta livslängd, och väghållaren leasar den. Entreprenören stimuleras då till att hitta lägsta möjliga livscykelkostnad, och kan t.ex. välja att prioritera högre kvalitet vid anläggningen för att minska underhållskostnader längre fram. Kravställningen ändras från att fokusera på tekniska detaljer i specifikationen, till att i stället framhäva hur väl den fungerar med avseende på körförhållanden, framkomlighet, och liknande.

4.4. Digitalisering

Kärnan i konceptet Construction Factory är digitalisering av anläggningsproduktion. Detta innefattar omfattande datainhämtning i realtid, koppling av data till modeller, kommunikation, styrning av processer på flera hierarkiska nivåer, samt sammanställning av data som dokumentation för framtida

behov. Anläggningsproduktionen är av nödvändighet att betrakta som ett system-av-system, där många olika aktörer samverkar, och informationen blir därför distribuerad.

Ett populärt begrepp just nu är digitala tvillingar. Detta kan enkelt uttryckt ses som en modell (matematisk eller simulering) av ett system, där initialtillståndet kontinuerligt uppdateras till att motsvara tillståndet i det verkliga systemet. Nyttan med detta är att tjäna som beslutsstöd, genom att man kan prediktera utfallet av olika beslut utifrån aktuellt tillstånd.

En utmaning i ett system-av-system är att det inte kommer att finnas en gemensam digital tvilling, utan att olika aktörer kommer ha sina egna representationer av verkligheten. Detta leder till utmaningar i att hålla dessa tillräckligt synkroniserade, vilket kräver datadelning och därmed interoperabilitet, vilket förutsätter gemensamma tekniska standarder. Projektet har lagt en bra grund genom att välja ett koncept för informationsrepresentation och datadistribution baserat på länkade data. Fördelen med detta är att man också kan representera semantisk information, och komplexa dynamiska strukturer, vilket är nödvändigt för att uppnå interoperabilitet. Det är likaså en teknik som även många andra branscher och domäner använder, t.ex. tillverkningsindustrin inom Industri 4.0.

Det behöver även finnas en vilja att dela data med andra aktörer, och det är inte självklart att göra detta i lägen där man samarbetar med konkurrenter. Därför behöver man också se över affärsmodeller och incitament för datadelning.

Arbetet med demonstrationer i projektet har tydliggjort några praktiska frågor som inte är fullt ut lösta i dagsläget. En aspekt är att det finns betydande mänskligt deltagande i de processer från vilka data hämtas, och detta har väckt frågor kring personlig integritet. Speciellt tydligt har detta varit vad gäller lastbilstransporterna från asfaltverket. Chaufförerna arbetar ensamma och är vana vid en relativt stor frihet, och är oroliga för ökad övervakning. Läggarlagen har däremot inte uttryckt lika tydliga åsikter om detta. De arbetar tillsammans på en plats och det är därmed redan idag synligare för andra vad de gör. Den personliga integriteten behöver respekteras, och man behöver titta på sätt att säkerställa att personlig information inte används om så inte krävs och inte sprids till fler än nödvändigt. Därtill behöver man fundera på vad chaufförerna kan få för nytta av information själva i sitt arbete, vilket kan göra att de ser en annan balans mellan nytta och det pris de upplever sig betala. Slutligen handlar det också om att förklara för dem på vilket sätt systemet faktiskt fungerar för att undvika farhågor baserade på missförstånd.

En annan svårighet handlar om trådlös kommunikation, som är absolut avgörande för konceptet. I demonstrationerna har svagheter funnits både vad gäller mobilnät och positionering. Speciellt syntes detta i Bålsta, där en stor byggnad med metallfasad effektivt skärmade av både GPS-satelliter och basstationer vid arbete nära byggnadens vägg. Det är dock lätt att föreställa sig andra situationer där liknande problem kan uppkomma, t.ex. arbete på landsbygden där mobilnätet är dåligt utbyggt, eller där det finns tät skog eller berg som skymmer. Lösningar behöver undersökas som gör det möjligt att förbättra positionering och mobilkommunikation i sådana situationer.

4.5. Automation och optimerad processtyrning

Syftet med digitala tvillingar är att ge ett bättre beslutsstöd, och detta gäller både för manuella beslut, där olika beslutsalternativs konsekvenser behöver visualiseras så tydligt som möjligt för en människa, och för automatiska beslut på olika nivåer.

Den lägsta nivån i produktionen är de olika arbetsmaskinerna och deras operatörer. Här pågår nu en intensiv utveckling av autonoma maskiner utan operatör. Mycket av denna utveckling handlar fortfarande om den enskilda maskinen, och att säkerställa att den kan utföra sitt arbete på ett säkert sätt baserat på den sensorinformation den har tillgång till. Speciellt utmanande är detta i öppna miljöer såsom arbete på en befintlig väg med trafik. Andra miljöer, t.ex. en bergtäkt, är lättare att stänga av och

därigenom minska risken för obehöriga och oskyddade personer. Att bara titta på den enskilda maskinen räcker dock inte, utan det är lika viktigt för en autonom maskin som för en operatörsstyrd att ha en förståelse för den process den ingår i, och vilket uppdrag den ska utföra. I manuellt styrda maskiner sitter operatören inne på mycket kunskap och erfarenhet som gör det möjligt att uttrycka arbetsuppgifterna ganska kortfattat och på en hög abstraktionsnivå, eftersom operatören själv kan fylla i de detaljer som saknas och utföra arbetet som tänkt. Detta är inte möjligt med autonoma maskiner, utan här krävs mycket mer detaljerad och precis representation av all information kopplad till produktionen som ska utföras. De frågor som projektet behandlar är därför minst lika viktiga i en framtida autonom produktion, och hela vägen fram dit, genom gradvis mer avancerat operatörsstöd och partiell automatisering.

Anläggningsproduktionen styrs hierarkiskt med många nivåer ovanför de enskilda maskinerna. Därför finns också behov av beslutsstöd, optimering, och även automatisering i de högre nivåerna. Projektet har undersökt möjligheterna till detta i tre olika fall: Det ena rör transportcyklerna i en bergtäkt, och här har flera olika typer av studier gjorts i detta och föregående projekt. Det andra kopplar till demonstrationen, och har fokuserat på samspelet mellan asfatsläggare och vältrar, men har främst studerats principiellt. Det tredje fallet gäller materialflöden från asfaltverk till läggare och här har initiala analyser från insamlade data i demonstrationerna gjorts.

Erfarenheterna från dessa undersökningar stödjer de grundläggande antagandena om att stora vinster finns att hämta genom bättre styrning och samordning av arbetet. Däremot behöver analyserna fördjupas, och tydligare kopplas till de olika typer av slöseri som beskrivs i Lean-metodik. En viktig fortsättning är också att sluta looperna, genom att baserat på data och beslutsstöd också styra processen i realtid, vilket det inte fanns utrymme att göra inom ramen för detta projekt.

4.6. Omfattning

Projektet, och dess föregångare, har fokuserat på två typer av anläggningsproduktion, nämligen asfaltutläggning och bergtäkt. Dessa utgör två centrala delar, men de har behandlats var för sig. Ambitionen har hela tiden varit att möjliggöra så att olika produktionsprocesser kan kopplas ihop, och att täcka många olika sorters produktion. Det skulle därför vara intressant att dels titta på hela kedjan från bergtäkt, över asfaltverk och till asfaltutläggning. Likaså behöver de steg i vägbyggnad som föregår ytlagret undersökas, t.ex. schaktning för att frilägga undergrunden och uppbyggnad av väggroppen med stenmaterial. Liknande arbeten utförs även på andra typer av infrastrukturer såsom järnväg. Arbetet med nyanläggning har en väsentlig skillnad mot asfaltering i att geografiska tredimensionella data blir viktigare. Detta område har berörts i projektet, men skulle behöva studeras noggrannare och även testas i verklig drift.

Mycket arbete med infrastrukturen sker i våra växande städer och det innebär speciella utmaningar. Ofta är det trångt på byggplatserna, med begränsade ytor för förvaring av material och uppställning av utrustning. Mycket annan trafik finns i närheten, vilket försvårar logistiken och gör den mer oförutsägbar. Säkerheten för personal kan också påverkas. Inte sällan måste man göra tillfälliga lösningar för att leda förbi trafik, och lägre framkomlighet bidrar till samhällskostnader som delvis är dolda. Här borde det finnas en potential för att förbättra anläggningsproduktionen genom digitalisering, där mer detaljerat informationsutbyte mellan anläggningsarbetet och andra verksamheter i den smarta staden kan möjliggöra bättre trafikledning, optimering mm.

5. Slutsatser

Konceptet Construction Factory har tagits fram i två tidigare mindre projekt, där fokus låg på att utforma en systemarkitektur för informationsutbyte i de system-av-system som uppstår i samband med anläggningsproduktion. Syftet med informationsutbytet är att kunna följa arbetet mer i detalj, och därmed också kunna planera, styra och dokumentera det mot ökad effektivitet och lägre miljöpåverkan.

Projektet Construction Factory Proof of Concept syftade till att förfinas och validera det framtagna konceptet samt prova det i verklig anläggningsproduktion. Medan tidigare faser främst tittat på bergtäkt, så har detta projekt i stället fokuserat på asfaltutläggning, inklusive logistikkedjan från asfaltverket. Genom den utvidgningen har projektet behövt kartlägga de aktuella användningsfallen och informationsbehoven i denna tillämpning. Viktiga delar i konceptet har förfinats, speciellt kopplat till planering och optimering samt informationsrepresentation, där utökningar behövts för tillämpningsspecifika aspekter. Arbetet med den praktiska demonstrationen har varit omfattande, och också innefattat implementering av teknikplattformen för datainsamling och uppföljning, samt en initial analys av de effekter man kan se i insamlade data. Slutligen har projektet aktivt arbetat med att sprida resultaten, både i branschen och genom vetenskapliga publikationer.

När det gäller projektets konkreta mål, såsom de formulerades i ansökan, så kan resultaten sammanfattas som följer:

1. *Ta fram tekniska lösningar och offentliggöra forskningsresultat som visar att konceptet kan realiserats som tänkt.* Detta mål är väl uppfyllt, både genom den teknikplattform som har implementerats och genom de förbättringar av konceptet som har genomförts.
2. *Validera att konceptet kan stödja projektledare och driftsansvariga i planerings- och optimeringsarbetet så att förbättringarna kan identifieras och hanteras.* Projektet har analyserat olika metoder för planering och optimering. Det blev dock inte möjligt att testa dessa i demonstrationen så därför behövs ytterligare förfining och validering i kommande arbete. Däremot har teorierna bakom presenterats och diskuterats internt i projektet, och funnits utgöra en vettig väg framåt.
3. *Validera att konceptet utifrån dessa planer kan stödja maskinoperatörer i att utföra arbetet så att effekterna realiserats.* Genom att konceptet provats på verkliga arbetsplatser har operativ personal fått en bild av vad det kan erbjuda, och gett värdefulla kommentarer på ytterligare förbättringar. Insamlade data påvisar också att positiva effekter kan nås, även om en fullständig analys inte har hunnits med.

Även om alla målen inte är fullt ut uppfyllda, så är det viktigt att förstå att många andra insikter har växt fram genom de praktiska erfarenheter som fåtts från arbete. Projektet har också haft stora externa utmaningar och förseningar, bl.a. beroende på Covid-19-pandemin, vilket gjort att demonstrationen legat väldigt sent i projektet. Därför behöver en del arbete med t.ex. djupanalys av data genomföras i efterföljande aktiviteter.

5.1. Vägen framåt

I föregående kapitel redovisades ett antal olika områden där ytterligare arbete behöver göras på vägen mot visionen om Construction Factory. Det är lämpligt att driva denna utveckling gradvis, och många av frågorna kräver fortsatta forskningsnära aktiviteter, medan andra är mogna för tester och valideringar i större skala. Framsteg kräver en fortsatt samverkan mellan nyckelaktörer. Beställare måste förändra sina former för upphandling och visa att man värdesätter inte bara pris i upphandlingen utan också klimat- och miljöpåverkan och livscykelkostnader. De behöver också tydliggöra vilken digital information de vill ha och på vilket sätt. Samtidigt måste entreprenörerna visa vilken potential som finns

i att bedriva arbetet på andra sätt med hjälp av digitalisering, och samarbeta för att hitta gemensamma och standardiserade sätt att utbyta information. På samma sätt behöver relationen mellan entreprenörer och maskinleverantörer vidareutvecklas. Entreprenörerna behöver värdera fler egenskaper hos maskinerna och tillverkarna behöver ta fram nya och standardiserade koncept för informationsutbyte som gör att maskiner av olika märken fungerar tillsammans i digitaliserade och alltmer automatiserade processer. Man måste dock inse att standarder inte uppstår ur tomma intet, och det kommer att krävas en omfattande pilotverksamhet för att bättre förstå vad som behöver standardiseras och på vilket sätt. Utrymme måste fortfarande finnas för olika aktörer att positionera sig för att främja konkurrens och vidare utveckling.

Ett viktigt steg mot minskad klimatpåverkan har tagits genom de färdplaner som arbetats fram av Fossilfritt Sverige. På motsvarande sätt skulle en färdplan för att digitalisera anläggningsproduktion behövas, som möter upp både behoven i klimatarbetet såväl som förbättrad produktivitet. En sådan färdplan kan peka ut både en långsiktig inriktning och etappmål på vägen. Olika insatser med offentlig eller privat finansiering behöver kopplas till detta och utgöra grunden för prioriteringar av hur medlen bäst kommer till nytta. I en prispressad och relativt konservativ bransch med många utmaningar behövs denna typ av visionär ledning för att hålla ångan uppe.

Referenser

- Byggföretagen (2018). Färdplan för fossilfri konkurrenskraft: Bygg- och anläggningssektorn. Rapport, Byggföretagen och Fossilfritt Sverige.
- S. Dersten, J. Fröberg, & J. Axelsson (2015). An Analysis of a Layered System Architecture for Autonomous Construction Vehicles. IEEE Intl. Systems Conference.
- DIN (2016). SPEC 91345: Reference Architecture Model Industrie 4.0 (RAMI4.0). Deutsches Institut für Normung.
- R. E. Fikes & N. J. Nilsson (1971). STRIPS: A New Approach to the Application of Theorem Proving to Problem Solving. *Artificial Intelligence*, 2(3-4):189-208.
- B. Flyvbjerg, M. Holm, & S. Buhl (2003). How common and how large are cost overruns in transport infrastructure projects? *Transport reviews*, 23(1), pp.71–88.
- I. Georgievski & M. Aiello (2014), An overview of Hierarchical Task Network Planning, arXiv:1403.7426v1 [cs.AI].
- IEEE (2010). IEEE Standard for Modeling and Simulation (M&S) High Level Architecture (HLA). Standard 1516-2010.
- J. E. Kelley & M. R. Walker (1959). Critical-path planning and scheduling. Eastern Joint IRE-AIEE-ACM Computer Conference, pp. 160-173.
- KTH (2012). <http://www.kth.se/aktuellt/nyheter/vagbyggens-miljobelastning-klart-underskattad-1.298765>.
- M. Maier (1998). Architecting Principles for System of Systems. *Sys. Eng.* 1(4).
- J.K. Mogali, S.F. Smith & Z.B. Rubenstein (2016), Distributed Decoupling of Multiagent Simple Temporal Problems, Proc. 25th Intl. Joint Conf. on Artificial Intelligence (IJCAI-16), New York.
- McKinsey & Co (2017). “Reinventing Construction: A Route to Higher Productivity.” Feb. 2017.
- D. Rylander, J. Axelsson, & P. Wallin (2014). Energy savings by Wireless Control of Speed, Scheduling and Travel Timers for Hauling Operations, in Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium.
- D. Rylander (2021). Productivity Improvements in Construction Transport Operation through Lean Thinking and Systems of Systems. Mälardalen University Doctoral Dissertation No. 350.
- SBMI (2019). Färdplan för fossilfri konkurrenskraft: Bergmaterialindustrin. Rapport, Sveriges Bergmaterialindustri och Fossilfritt Sverige.
- Trafikanalys (2015). Anläggningsbranschen – aktörer, finansiärer och personal. PM 2015:1.
- Trafikverket (2012). ”Det smarta projektet.” <https://www.youtube.com/watch?v=uURASozmCxI>.

Bilaga 1: Projektdeltagare

I tabellen nedan presenteras projektets deltagare. Utöver detta har bl. a. Skanska Industrial Solutions läggatlag 2 och 5 deltagit i projektets demonstrationer.

Namn	Organisation	Roll i organisationen	Roller i projektet
Martin Aronsson	RISE	Forskare	Arbetspaketledare AP4
Jakob Axelsson	Mälardalens högskola	Professor	Projektleddare, arbetspaketledare AP1 och AP5, styrgruppsrepresentant
Peter Axelsson	Trafikverket	Behovsägare, expert på digitalisering	Projektdeltagare
Martin Blohm	Skanska	Specialist VTC-Teknik	Projektdeltagare
Joakim Fröberg	RISE	Forskare	Arbetspaketledare AP3
Pontus Gruhs	Trafikverket	Behovsägare, strategisk utveckling	Projektdeltagare, Trafikverkets styrgruppsrepresentant
Pär Hansson	RISE	Forskare	Arbetspaketledare AP6
Per-Ola Jönsson	Skanska	Avdelningschef OPEX SIS	Projektdeltagare
Martyn Luby	Volvo CE	Business Development Manager	Projektdeltagare
Jan-Erik Lundmark	Trafikverket	Behovsägare, expert på vägbeläggning	Projektdeltagare
Roger Nilsson	Skanska	Specialist VTC-Teknik	Projektdeltagare
David Rylander	RISE	Forskare	Arbetspaketledare AP8, styrgruppsrepresentant
Jörgen Simu	Trafikverket	Behovsägare, investeringsverksamheten	Projektdeltagare
Peter Sjöberg	Volvo CE	Program Leader - Service Solutions	Projektdeltagare
Henrik Sjöholm	Skanska	Specialist OPEX SIS	Projektdeltagare
Christian Spjutare	Volvo CE	Program Manager - Service Solutions	Arbetspaketledare AP7 och AP8
Anders Wallberg	RISE	Forskare	Projektdeltagare
Peter Wallin	Mälardalens högskola	Forskare	Arbetspaketledare AP9
Jesper Åström	Volvo CE	Lead Engineer SW	Projektdeltagare

Bilaga 2: Publikationer från projektet

Nedanstående vetenskapliga publikationer utgör resultat av projektet. Vissa av dem har helt tagits fram inom detta projekt, medan andra har påbörjats i tidigare projekt och slutförts här. En konferensartikel belönades med pris för bästa bidrag på konferensen (Axelsson, 2020).

Avhandling

Rylander, D. (2021). *Productivity Improvements in Construction Transport Operation through Lean Thinking and Systems of Systems*. Mälardalen University Doctoral Dissertation No. 350.
<http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:mdh:diva-56306>.

Tidskrift

Axelsson, J., Fröberg, J., & Eriksson, P. (2019). Architecting systems-of-systems and their constituents: A case study applying Industry 4.0 in the construction domain. *Systems Engineering*, 22(6):455–470. <https://doi.org/10.1002/sys.21516>.

Konferenser

Axelsson, J. (2019). A Refined Terminology on System-of-Systems Substructure and Constituent System States. *IEEE Systems of Systems Conference*, pp. 31–36.
<https://doi.org/10.1109/SYSOSE.2019.8753846>.

Axelsson, J. (2019). Experiences of Using Linked Data and Ontologies for Operational Data Sharing in Systems-of-Systems. *IEEE Systems Conference*, pp. 396–403.
<https://doi.org/10.1109/SYSCON.2019.8836909>.

Axelsson, J. (2020). Achieving System-of-Systems Interoperability Levels Using Linked Data and Ontologies. *30th INCOSE International Symposium*, pp. 651–665. <https://doi.org/10.1002/j.2334-5837.2020.00746.x>.

Rylander, D. and Axelsson, J. (2021). Design and Evaluation of a System of Systems Architecture for the Optimization of a Cyclic Transport Operation. *IEEE Systems of Systems Conference*, pp. 114–119.
<https://doi.org/10.1109/SOSE52739.2021.9497486>.