



Miljøministeriet
Miljøstyrelsen

Autonom traverskran til fremme af bæredygtigt byggeri **MUDP-rapport**

MUDP Rapport

Juli 2023

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:

Cand.polyt. Andreas Lolle

Cand.polyt. Steffen Nielsen

ISBN: 978-87-7038-531-2

Miljøstyrelsen offentliggør rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, som er finansieret af Miljøstyrelsen. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse.

Indhold

1.	Forord	5
2.	Konklusion og sammenfatning	6
3.	Conclusion and summary	8
4.	Indledning	9
4.1	Formål	9
4.2	Mål og succeskriterier	10
4.2.1	Delmål 1 – autonom docking	10
4.2.2	Delmål 2 – vision baseret sway control	10
4.2.3	Delmål 3 – Positionerings og navigationssystem	10
4.2.4	Delmål 4 – Samkørsel af udviklingsspor	11
4.3	Conhoist systemet	11
4.3.1	Brugskonfigurationer og scenarier	11
4.4	Brugere og aktører	13
5.	Projektets proces og arbejdsform	15
6.	Arbejdspakke 1 - Udvikling af autonomt docking system	16
6.1	Udvikling af optimeret batteriteknologi og undersøgelse af autonom control logic i brugskonteksten	17
6.1.1	Særlige krav til batteriet	19
6.1.2	Logik for autonom docking	21
6.2	Mekanisk design af docking	22
7.	Arbejdspakke 2 - Udvikling af vision baseret sway control	24
7.1	Forundersøgelse af krav til algoritme og undersøgelse af vision baseret positionering (bestemmelse af position)	24
7.1.1	Svingende laster	25
7.1.1.1	Vindlast	25
7.1.1.2	Acceleration/Deceleration	25
7.1.1.3	Kørsel mod endestop	25
7.1.1.4	Decentreret byrde	26
7.1.1.5	Øvrige faktorer	27
7.1.2	Bestemmelse af lastens position	28
7.2	Udvikling af control logic og udvikling af algoritme til minimering af svingning samt sensorsystem og feed-back loop.	29
8.	Arbejdspakke 3 - Udvikling af positionerings- og navigationssystem	33
8.1	Sensorsystem til høst af data	33
8.1.1	Faktorer der skal tages højde for i den fysiske kontekst	35
8.2	Optimering af data og effektivisering af systemets tilgængelighed	37
8.2.1	Sikkerhed	38
8.2.2	Gøre sig selv tilgængelig efter opladning	39
8.2.3	Kørsel til prædefinerede destinationer	39

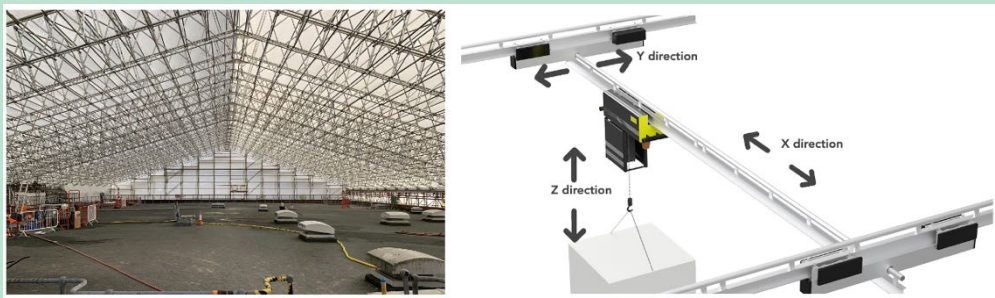
8.2.4	Forbudte områder	40
9.	Arbejdspakke 4 – Samkørsel af udviklingsspor	42
9.1	Tilrettelæggelse af arbejds pakken	42
9.2	Evaluerings på mål og succes kriterier	43
Bilag 1.	Analyse af anvendelsesgraden af gængse laster ved energirenovering	46

1. Forord

Industrialisering af byggeriet er i en årrække blevet fremstillet som et middel til at skabe produktivetsforbedring og selvom der findes konkrete eksempler på, at det er lykkedes, er der også mange eksempler på at det er en vanskelig opgave. Dette skyldes en række indbyrdes afhængige strukturelle og organisatoriske faktorer som er tidskrævende at ændre, men udfordringen har også en teknisk dimension som skal adresseres. For byggeriet er konteksten byggepladsen og den adskiller sig særligt fra industriproduktion i fabrikshaller ved dens midlertidige karakter, hvor alle maskiner og udstyr skal transporteres, opstilles og klargøres for så efter endt projekt at demonteres igen. Denne forskel stiller afgørende krav til det tekniske materiel, og derfor skal udstyr til byggeriet tage højde herfor. Dette gælder ikke mindst når man taler om relativt avanceret og fintfølelse udstyr, hvor maskiner baseret på en række input fra diverse sensorer skal agere autonomt, hvilket er et kendetegn for den seneste industrielle revolution - Industri 4.0.

Et andet kendetegn ved Industri 4.0 er integrationen imellem den fysiske virkelighed og virtuelle modeller. I forhold til virtuelle modeller er der i byggebranchen sket en kolossal udvikling igennem digitalisering og digitale værktøjer. Dette er spændende og vigtigt fordi det forhåbentligt klæder branchen på til at imødekomme ikke alene produktivetsudfordringen men også den omvæltning som er nødvendig for at en bæredygtig grøn omstilling kan finde sted i byggeriet. Desværre er der ikke sket en tilsvarende udvikling, når man kigger på de fysiske maskiner som anvendes på byggepladsen idet mange fysiske værktøjer som anvendes i branchen, ikke har ændret sig nævneværdigt over de seneste 10-20 år. Dette er bemærkelsesværdigt og et problem, at samfundets teknologiske stadie ikke overføres og anvendes på samme måde som i industrien.

Derfor er det vigtigt, at den fysiske værktøjsskabe udvikles med de teknologiske muligheder, der eksisterer i dag og derved hjælper med at bane vejen for fremskridt i forhold til produktivitet og grøn omstilling. Dette har netop været formålet med dette MUDP-projekt. Konteksten for projektet har været totaloverdækningen som særligt anvendes ved energirenoveringer, jf. FIGUR 1 (Tv.) og det arbejde der typisk udføres herunder. Det fysiske redskab har været Conhoist' traverskran, FIGUR 1 (Th.), som indgår i overdækningen. I projektet er der blevet arbejdet med teknologiudvikling af denne kran, således en række autonome funktioner er blevet realiseret og systemet derved kan bidrage til såvel grøn omstilling som produktivetsforbedringer.



FIGUR 1. (Tv.) Billede af tagflade med totaloverdækning (kilde: <https://www.altraddessa.com/case-studies/roofing-study-01-2-4-5-2-3-2/>) (Th.) Illustration af Conhoist' traverskran.

2. Konklusion og sammenfatning

Projektet har haft den overordnede målsætning at udvikle en traverskran til byggebranchen imod højere grad af autonomi og effektivisering således at løsningen kan blive et værktøj, der bidrager til højere rater af energirenoveringer med de gevinster der følger bl.a. i form af reduceret materiale- og ressourceforbrug (sammenlignet med nybyg) og lavere energiforbrug til opvarmning. Endvidere har projektet haft ambitionen om at tøjle og udvikle moderne og tidssvarende teknologier i et fysisk redskab til byggebranchen, der er kendetegnet ved at være langsomme til at adoptere de muligheder, der opstår qua teknologiske fremskridt sammenlignet med øvrig industri. Fundamentet i projektet har været et grundigt research arbejde, der har kortlagt generelle såvel som kontekstafhængige forhold, der har en betydning for hvordan det er muligt at anvende tidssvarende teknologi i et fysisk redskab, der skal kunne tåle den hårdhændede behandling af maskiner som er karakteristisk for branchen.

I projektets arbejdsplan 1 blev der arbejdet med autonom docking (opladning af batteri). For at dette kunne realiseres måtte en række behov imødekommes. Der blev således arbejdet med udvikling/tilpasning af de specifikke batterier som skulle anvendes. Endvidere blev der fokuseret på at fastlægge, hvilke forhold der var styrende for dimensionering af batteriet samt hvilken strategi for opladning, der gav mest mening. Endelig blev der udviklet et særdeles robust system for det mekaniske design af docking, der opfylder de krav der stilles i en kontekst af midlertidige stilladskonstruktioner, hvor tolerancer og præcision er markant anderledes end ved produktion i en industrihal.

I arbejdsplan 2 var fokus rettet imod udvikling af løsninger, der kan reducere eller eliminere svingende laster. Dette var vigtigt i almindelighed og særligt i relation til autonomi fordi svingende laster potentielt kan udgøre en væsentlig fare, idet de kan kolliderer med personer eller bygningsdele. Arbejdet inkluderede en kortlægning af de forhold, der potentielt skaber svingninger og en prioritering af deres betydning. Det indeholdt videre en udvikling af et system til positionering af lasten samt udvikling af kontrol logikker til imødekommelse af de identificerede problemområder. Endelig blev konkrete løsningsalgoritmer implementeret for de to højest prioriterede problemområder.

I arbejdsplan 3 blev der arbejdet med to koncepter for hvorledes systemet kunne navigere i brugskonteksten. Det bedst egnede koncept blev valgt og den konkrete løsning blev udfoldet inklusiv det fulde system af sensorer, hvis data var en forudsætning for navigationssystemets virkningsfuldhed. Datakvaliteten fra sensorer blev optimeret ved grundig udviklings- og testarbejde og det endelige resultat dokumenteret. Endvidere blev der arbejdet med konkrete koncepter for hvorledes systemet kunne øge sin tilgængelighed via autonome funktioner. Der blev arbejdet med tre koncepter, hvoraf to blev implementeret.

I projektets afsluttende arbejdsplan 4 blev alle udviklede delfunktioner testet i en 1:1 kontekst. Resultatet var særdeles positivt idet det kunne konkluderes at 8 ud af projektets 10 resultatomål var blevet indfriet. Endvidere kunne det konkluderes at projektet havde affødt to væsentlige afledte effekter. Den ene var en kortlægning af de fordele, der kunne opnås ved at inkludere cloud connectivity i det fysiske system. Herved kunne brugsdata opsamles og visualiseres og ny funktionalitet kunne på baggrund af data udvikles og implementeres løbende. Den anden var en ide til en alternativ og fordelagtig opbygning af det mekaniske system. Denne ide opstod i forbindelse med udviklingen af sensorsystemet. Efter projektets afslutning

blev ideen konkretiseret og udmøntede sig i en patentansøgning, som i fald den fører til udstedelse af et patent, vil styrke systemets position på markedet ikke mindst i forhold til eksport. Det kan således afslutningsvis konkluderes at projektet har opnået resultater der uden tvivl vil bidrage til den overordnede målsætning om et system, der via højere grad af autonomi vil effektivisere arbejdet ved energirenoveringer.

3. Conclusion and summary

The overall objective of the project has been to develop a traverse crane for the construction industry towards a higher degree of autonomy and efficiency so that the solution can become a tool contributing to higher rates of energy renovations with the resulting benefits in terms of reduced material and resource consumption (compared to new construction) and lower energy consumption for heating. Furthermore, the project has had the ambition to harness and develop modern and up-to-date technologies in a physical tool for the construction industry, that are characterised by being slower to adopt the opportunities arising from technological advances compared to other industries. The foundation of the project has been thorough research that has mapped general as well as context-dependent conditions that have an impact on how it is possible to apply state-of-the-art technology in a physical tool that must be able to withstand the harsh treatment of machines that is characteristic for the building industry.

Work package 1 of the project dealt with autonomous docking (battery charging). For this to be realised, a number of problems had to be solved. First, the development/adaptation of the specific batteries to be used was carried out. Then the focal point was towards determining the conditions that governed the sizing of the battery and the most appropriate charging strategy. Finally, an extremely robust system for the mechanical design of the docking was developed, meeting the requirements of a context of temporary scaffolding construction where tolerances and precision are in a completely different place compared to industrial standards.

Work package 2 focused on the development of solutions to reduce or eliminate swaying loads. This was important in general and in particular in relation to autonomy because swaying loads can potentially pose a significant hazard by colliding with people or building components. The work included a mapping of the conditions that potentially create sway and a prioritisation of their importance. It also included the development of a load positioning system and control logics to address the identified problem areas. Finally, concrete solution algorithms were implemented for the two highest priority problem areas.

In work package 3, two concepts for how the system could navigate in the context were developed. The most suitable concept was chosen, and the specific solution was unfolded including the full system of sensors whose data was a prerequisite for the effectiveness of the navigation system. The data quality from the sensors was optimised by thorough development and testing and the results were documented. Furthermore, specific concepts were developed on how the system could increase its availability through autonomous functions. Three concepts were considered, two of which were implemented.

In the final work package 4 of the project, all the developed functionality was tested in a 1:1 test setup. The result was very positive, concluding that 8 out of the 10 performance targets of the project had been met. Furthermore, it could be concluded that the project had generated two significant spin-off effects. One was a mapping of the benefits that could be achieved by including cloud connectivity in the physical system. This allowed usage data to be captured and visualised and new functionality to be developed and implemented on an ongoing basis. The second was an idea for an alternative and advantageous design of the mechanical system. This idea arose during the development of the sensor system. After completion of the project, the idea was concretised and resulted in a patent application which, if it leads to the granting of a patent, will strengthen the system's position on the market, specifically in relation to export. In conclusion, the project has achieved results which will undoubtedly contribute to the overall objective of a system which, through a higher degree of autonomy, will make the work of energy renovation more efficient.

4. Indledning

4.1 Formål

Ved energirenoveringer anses totaloverdækning i dag som en selvfølge fordi det klimasikrer byggeriet og skaber et godt arbejdsmiljø for de udførende. Anvendelsen af totaloverdækninger skaber dog samtidig en logistisk udfordring idet materialer ikke længere kan løftes på plads med traditionelle lastbil- eller tårnkraner. Derfor må overdækninger periodisk flyttes når dette er påkrævet og/eller materialer håndteres manuelt i mindre emballeringer med dårligt arbejdsmiljø til følge.



Conhoist vil industrialisere og effektivisere byggeprocessen ved energirenoveringer under totaloverdækninger

FIGUR 2. Totaloverdækning ved DR-byen i Århus.

Conhoist vil gøre op med denne problematik og industrialisere og effektivisere byggeprocessen ved energirenoveringer ved at tilbyde en intelligent kranløsning i totaloverdækninger. Dermed kan materialer håndteres effektivt uden periodisk at åbne overdækningen eller ved manuel håndtering. Dette understøtter den bæredygtige omstilling af byggebranchen ved en indvirkning på det sociale (arbejdsmiljø) samt det økonomiske- og miljømæssige område.

Hovedformålet med projektet har været at udvikle en række autonome funktioner til Conhoist for at reducere manuelt arbejde, tidsoptimere arbejdsopgaver og reducere den totale byggesagstid. Derved gøres energirenoveringer mere lønsomme og vil potentielt resultere i en højere renoveringsrate.

4.2 Mål og succeskriterier

Med udgangspunkt i projektets overordnede formål blev konkrete succeskriterier defineret. De ses i TABEL 1. De første tre delmål definerede selvstændige succeskriterier for udviklingsspor i projektet mens det fjerde og sidste delmål var en integration og vurdering af udviklingsaktiviteternes samlede effekt. Under tabellen gives en kort forklaring til delmålene.

TABEL 1. Projektets mål og succeskriterier.

Projektets mål	Succeskriterier
1) Udvikling af autonomt docking system	Lab test og direkte svar på om kriteriet er nået
2) Udvikling af vision baseret sway-control	Lab test og direkte svar på om kriteriet er nået
3) Udvikling af positionerings- og navigationssystem	Lab test. 1) Sensorsystem til høst af data 2) Optimering af data og effektivisering af systemets tilgængelighed.
4) Samkørsel af udviklingsspor	On site test på byggeplads

4.2.1 Delmål 1 – autonom docking

Det første delmål omhandlede udvikling af et autonomt docking system til opladning af systemets batterier. Den afgørende fordel ved batterier i den konkrete kontekst er, at man ikke skal trække kabler eller installere strømskinner. Dette er både tidskrævende og fordyrende i opsætningen og da løsningens typiske anvendelsesperiode er 2-6 måneder førend det skal flyttes til et nyt site, giver batteriløsningen fordele på opsætningstid og økonomi. Det er selvfølgelig afgørende at batterierne er dimensionerede korrekt og at opladning sker efter behov således de ikke løber tør på et tidspunkt hvor kranen skal bruges. Og her kommer den autonome docking i spil, hvor systemet selv skal finde til opladning på det bedste tidspunkt afhængig af konteksten.

4.2.2 Delmål 2 – vision baseret sway control

Det andet delmål omhandlede udvikling af sway control, som er betegnelsen for den reguleringsteknik der skal sikre at kranens last ikke svinger uhæmmet fra side til side. Denne funktionalitet er vigtig at flere årsager. Først og fremmest bidrager den med en effektiviserende effekt. Dette gælder eksempelvis når et tungt vindueselement på flere hundrede kilo skal monteres. Et sådant element vil efter transport typisk svinge flere meter fra side til side og brugeren må vente indtil svingningerne er aftaget førend elementet kan sænkes på plads til montage. For tunge elementer tager dette lang tid og her kan sway control sikre, at svingninger begrænses til et minimum så der ikke er ventetid i montageopgaver. Dernæst har funktionen et væsentligt sikkerhedsperspektiv idet svingende laster kan udgøre en kollisionsfare. Det gælder for bygningsdele såvel som stilladskonstruktionen og ikke mindst de udførende som benytter kranen. Sway control er derfor vigtig for at undgå farlige situationer, hvor svingende laster beskadiger bygningen eller personel der færdes i nærheden af kranen.

4.2.3 Delmål 3 – Positionerings og navigationssystem

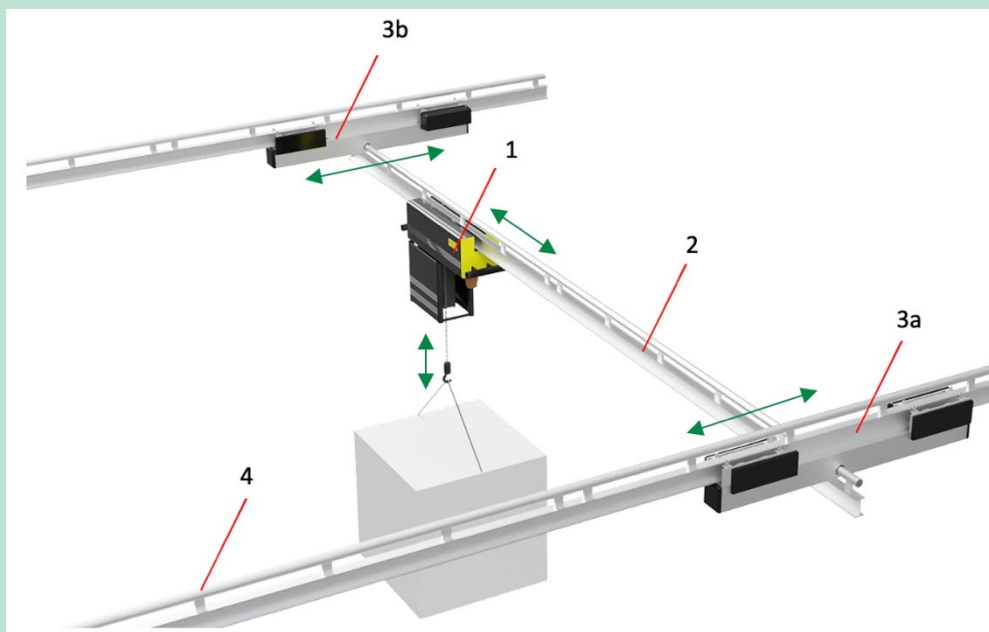
Tredje delmål handlede om udvikling af positionerings- og navigationssystem. Her er tale om autonome funktioner hvor systemet ved hjælp af sensorinput kan orientere sig i brugskonteksten og automatisk køre til en placering hvor det giver mening. Det kunne for eksempel være efter opladning at systemet selv kører hen til det sted hvor det senest blev brugt for derved at øge sin tilgængelighed for brugerne. Et andet eksempel er favoritpositioner, hvor brugere kan indstille en lokation som systemet selv kører hen til – eksempelvis et hejsefelt eller et materialeårn. Positioneringssystemet kan også bruges til at indstille forbudte zoner hvor kranen ikke må køre. Det kan være et tårn eller spir på en bygning, hvor kranen ikke må køre over fordi lasten potentielt kan beskadige denne del af bygningen.

4.2.4 Delmål 4 – Samkørsel af udviklingsspor

Delmål fire var en samkørsel af de tre forudgående udviklingsspor samt en vurdering af deres kombinerede effekt. Delmålet blev defineret for at sikre, at de tre forudgående udviklingsspor ville fungere i kombination rent teknisk såvel som i konteksten. Endvidere var det vurderingen, at tekniske dele af løsningen i et udviklingsspor potentielt bruges til at udvide funktionalitet og øge værdiskabelsen i et andet udviklingsspor. Disse muligheder skulle kortlægges. Samtidig skulle der kortlægges yderligere forbedringspotentialer som fremadrettet kunne bygges ovenpå den eksisterende teknologiudvikling. Derved kunne projektet både konkludere på effekter samt hvilke fremtidige udviklingsperspektiver og fokusområder der findes for løsningen.

4.3 Conhoist systemet

Conhoist' kran system er modulært opbygget. Det består i sin opbygning af 4 hovedkomponenter som illustreret i FIGUR 3. Med reference til illustrationen ses hejsen (1) i midten. Den kan køre langs den tværgående bridge skinne (2) og løfte en last op og ned. Bridge skinnen (2) er i begge ender monteret i et trolley modul (3a og 3b) som kan køre langs de parallelle runway skinner (4). Når systemet monteres på undersiden af overdækningen, kan det derved transportere alle laster op/ned samt flytte dem i et vandret plan. Dermed transformeres overdækningen til en slags fabriksdal med kranløsning som både eliminerer manuelle løft samt muliggør en ny måde at arbejde på, nemlig ved montage af prefab elementer i stedet for at altting skal bygges in-situ. Hele systemet er fjernstyret med fjernbetjening.



FIGUR 3. Conhoist' kran er modulært opbygget og består af følgende hovedkomponenter. Hejs (1). Tværgående bridge skinne (2). Trolley modul (3a) og (3b). Parallelle runway skinner (4).

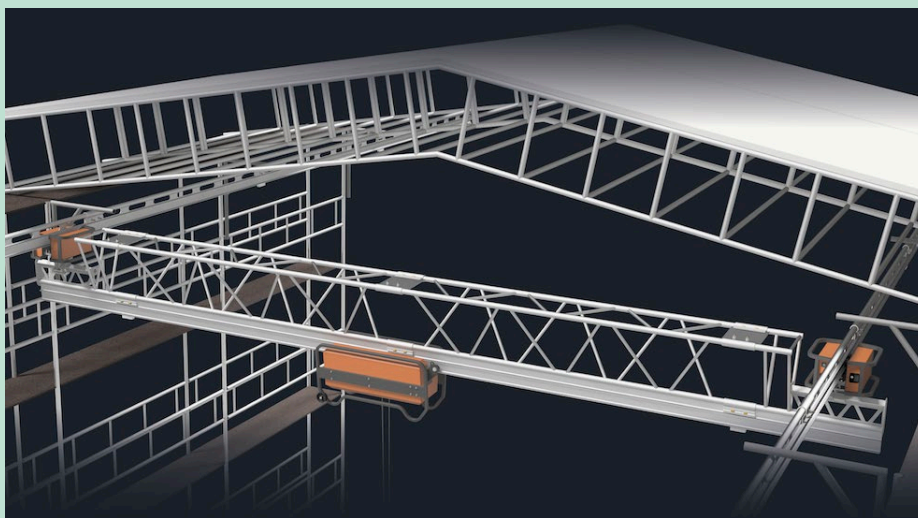
4.3.1 Brugskonfigurationer og scenarier

Conhoist indeholder i kraft af det modulære design en høj grad af fleksibilitet der gør at den også kan bruges i en række andre brugskonfigurationer. I projektet har det været vigtigt at videreudvikle designet således denne fleksibilitet er blevet udbygget og anvendelsesgraden af løsningen øget. I FIGUR 4 ses systemet i travers konfiguration og i FIGUR 5 ses det i hhv. monorail og curve konfiguration. Det er lykkedes at genbruge de samme moduler på tværs af de forskellige brugsscenarier til at realisere de forskellige konfigurationer.

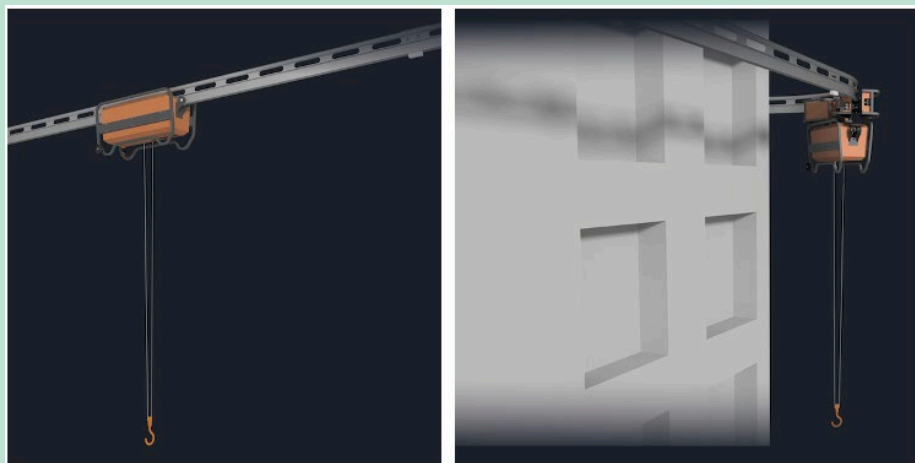
**Fleksibiliteten
øger anvendelsesgraden og
dermed de resulterende effekter af projekts resultater.**

Eksempler på anvendelser i traverskonfiguration er løft og montage af spær konstruktioner, karnapper, tagvinduer og teglsten. Ligesom en typisk anvendelse er bortskaffelse af affald der kan sorteres i big bags og hejses hen til materialelift eller direkte til gade niveau hvor en lastbil håndterer den videre transport.

Eksempler på anvendelse i mono eller curve konfiguration er facadearbejde - løft af vinduespartier og facadepartier. Demontering af gamle facadepartier og løft til gade niveau hvor videre transport kan ske med bil. Håndtering af materialer hvor der kræves både lodret og vandret transport. Det vil sige materialer og udstyr der skal hejses fra gadeplan og transporteres vandret hen over bygningens tag til det sted hvor de skal benyttes, eksempelvis ruller med tagpap, gasflasker, isolering mv. Der har været vigtigt at arbejde med dette fordi fleksibiliteten øger anvendelsesgraden og dermed de resulterende effekter af projektets resultater.



FIGUR 4. Conhoist monteret i traverskonfiguration.



FIGUR 5. Tv.: Conhoist monteret i monorail. Th.: Curve configuration hvor Conhoist kan køre omkring hjørner.

4.4 Brugere og aktører

Det har i projektet været vurderingen at hele værdikæden er interessant i forhold til Conhoist' løsning og derfor vil brugere og aktører samt deres interesser i relation til Conhoist systemet i det følgende kort blive beskrevet. De forskellige aktørers behov er i projektet blevet analyseret på baggrund af interviews, møder, desktop research, samt antropologiske studier på konkrete byggepladser.

Bygherren skal sikre at der er grundlag for at en entreprise kan gennemføres på forsvarlig vis i forhold til sikkerhed og sundhed. Bygherren vil typisk benytte en **bygherrerådgiver** til at bistå med dette. I forbindelse med renovering er det et særligt fokuspunkt for bygherren, at byggeriet kan gennemføres fugtsikkert. Endvidere er en effektiv og bæredygtig byggeproces i bygherrens interesse. Totaloverdækningen med Conhoist' kran løsning kan bidrage til det fugtsikre byggeri samt godt arbejdsmiljø og effektiv byggeproces. Derudover kan Conhoist bidrage til demontering af bygningsdele/elementer som kan genanvendes ligesom den kan bidrage ved en decentral sortering af affald.

Hovedentreprenøren har det direkte ansvar for arbejdsmiljøet for de ansatte samt den konkrete udførelse af arbejdet. Hovedentreprenøren er særlig interessant for Conhoist' kran fordi den muliggør en mere industriel måde at udføre arbejdet på hvor større prefab elementer hejses på plads i stedet for at blive bygget in-situ. Dette er en mere effektiv måde at bygge på men det kræver samtidig en ændret tilrettelæggelse af arbejdet og muligheden skal derfor synliggøres for både entreprenører og rådgivere. Derudover er det typisk hovedentreprenørens opgave at sørge for en egnet stilladskonstruktion til entreprisen, hvor igen muligheden for at vælge en stilladsløsning med kran skal være i entreprenørens bevidsthed.

Stillads/materieludlejer køber deres udstyr hos forskellige producenter og lejer det ud til entreprenører. Deres interesse i Conhoist kan være at kunne tilbyde nye og mere effektive løsninger til deres kunder. I projektet har stilladsudlejere været interessante særligt fordi de transporterer og monterer både overdækning og kran. Generelt får stilladsgrej en hårdhændet behandling i den proces og det er afgørende at teknologien som udvikles, kan tåle den kontekst som den skal fungere i. Dernæst har det været et fokuspunkt ikke at skabe et arbejdsmiljøproblem ved at tungt kran udstyr skal håndteres af stilladsarbejdere. Et fokuspunkt har derfor været at designe løsning så letvægt som muligt samt at gøre den enkel at montere på stilladset.

Stilladsproducenten producerer stilladser og stilladsoverdækninger og sælger dem til stilladsudlejere. Stilladsproducenterne er vigtige for Conhoist fordi de kan være med til at udvide kendskabet om kranløsningen når de sælger deres løsninger. I Nordeuropa og Skandinavien er markedet domineret af store Tyske og Svenske producenter. Når en overdækning monteres, skal den som udgangspunkt beregnes så dimensionering kan tåle vindlast og snebelast. De fleste producenter laver standard eksempel beregninger, hvorved det ved tabelopslag bliver muligt at dimensionere en overdækning korrekt uden at skulle lave en komplet beregning fra bunden. Dette er interessant for Conhoist i forhold til at få inkluderet anvendelsen af kranen i standardberegninger, så overdækninger med kran kan beregnes og dimensioneres tilsvarende enkelt.

Alle **faggrupper** som arbejder under overdækningen er potentielle brugere af kranen. Det kan både være ansatte hos hovedentreprenøren eller hos underentreprenører der arbejder i fagentrepriser. Blandt disse brugere er bl.a. **tømrer, murer, VVS'er, tagdækkere, nedriver**.

Endeligt skal nævnes to grupper af aktører som er lidt mere perifere, men også kan have interesse for projektet og derfor er blevet involveret i projektets research arbejde. Det gælder den type af **materialeproducenter** som laver nye byggematerialer ved genanvendelse. Det gælder både direkte genanvendelse hvor man som i tilfældet med teglsten (tag eller mur) kan genbruge dem direkte i nyt byggeri eller ved forarbejdning, eksempelvis gammelt konstruktionstræ

som skæres til planker der kan indgå i facadebeklædning. Her har det været interessant i projektet at undersøge hvordan Conhoist kan bruges i processen med at demontere en eksisterende bygning. Endelig er der den sidste gruppe nemlig **modtagere/behandlere af byggeaffald** der er interessant fordi de håndterer de fraktioner som i første omgang kasseres fra gamle bygninger. Fraktionerne kan genbruges i et eller andet omfang, lettest når de er rene, dvs. ikke blandet med andet affald, og derfor har det været interessant at undersøge om Conhoist kan spille en rolle i den decentrale kildesortering af byggeaffald.

5. Projektets proces og arbejdsform

Projektet har benyttet en agil og iterativ proces, hvor de overordnede succeskriterier og aktiviteter blev brudt ned i konkrete opgaver som blev planlagt og udført i udviklingsloops af 2-3 ugers varighed. Efter hver iteration gennemførte projektgruppen med den ny viden og de nye resultater som blev tilvejebragt planlægningen af et nyt udviklingsloop. Derved blev arbejdet dynamisk og gav en følelse af aktualitet. Udviklingsloops indeholdt en god vekselvirkning imellem teori og praksis og projektet har haft som ambition at gennemføre hyppige afprøvninger på såvel internt test set up som på konkrete byggepladser for at generere erfaring og viden til det videre forløb. I FIGUR 6 ses til venstre afprøvning på et konkret site, mens billedet til højre viser en afprøvning på et internt test set up.

Et andet kendetegn for projektarbejdet har været, at der blev arbejdet parallelt med alternative delløsninger. Dette var forudsætningen for ved en relativ sammenligning at kunne vurdere om en given løsning var god og samtidig fungerede løsningsalternativer som en plan B, der kunne tages i anvendelse hvis plan A viste sig uhensigtsmæssig. Dette blev i flere tilfælde aktuelt og det er vurderingen at denne måde at arbejde på har været mere effektiv end hvis der kun havde været et alternativ. For på trods af, at det på nogle tidspunkter i processen var krævende at holde alternative løsninger i spil, så sikrede det at fremskridt i projektet ikke gik i stå fordi en enkeltstrengt løsningsstrategi viste sig ikke at være mulig.

Endelig har projektet som beskrevet i afsnit 4.4 benyttet sig af kortlægningen af relevante aktører i værdikæden. Dette blev gjort for at sikre at den endelige løsning blev designet, så den opfylder de krav der er i markedet. Det er vurderingen at det samtidig har haft den fordel at kendskabet til løsningen er blevet udbredt, hvilket igen kan øge effekten og udbredelsen af projektets resultater.



FIGUR 6. Afprøvning på en konkret byggeplads (tv) og afprøvning på intern test set up (th).

6. Arbejdspakke 1 - Udvikling af autonomt docking system

Der var forud for projektet opstillet en række resultatomål til teknologiudviklingen af systemet som skulle indfries for at kunne opnå tilfredsstillende resultater. I TABEL 2 er disse listet for arbejdsapakke 1 med uddybende forklaring.

TABEL 2. Resultatomål for udvikling af optimeret batteriteknologi.

Resultatomål for arbejdsapakke 1	Forklaring
• Udvikling af optimeret batteriteknologi	Batteriets kapacitet skulle imødekomme behovet og muliggøre den ønskede funktionalitet. Dette krævede korrekt dimensionering og det krævede datakommunikation med batteriets BMS (battery management system) for at kende SoC (state of charge) og detektere om opladning var i gang. Endvidere skulle systemet bruge strøm mens det var i docking. Dette krævede simultan opladning/afladning hvilket ikke findes som standard løsning.
• Undersøgelse af autonom control logic i brugskonteksten	Det var vigtigt af få brugskonteksten for den autonome opladning bedre belyst for at kunne sige noget om hvilken strategi og logik der kunne anvendes. Som eksempel kan nævnes om opladningsstrategien kunne basere sig på at oplade i løbet af en arbejdsdag eller om brugsfrekvensen ikke tillod dette. Endvidere blev sikkerhedsaspektet grundigt undersøgt i forhold til at kunne definere hvilke kriterier der skal være opfyldt for at en relativ stor kran der kan løfte 800 kg på forsvarlig vis kan blive selvkørende.
• Mekanisk design af docking	Det velfungerende mekaniske design af docking skulle leve op til en række krav i forhold til robusthed og fleksibilitet. Der blev i projektet afsøgt forskellige typer af docking systemer ligesom der blev undersøgt om eksisterende løsninger kunne tilpasses eller om nyudvikling var nødvendig for at imødekomme kravene.

Det var vurderingen at yderligere undersøgelser af brugskontekst og behovssituation var nødvendig før egentlig udvikling kunne begynde. Derfor var første trin i processen gennemførelse af feltarbejde og analyse hvor behovet for alle aktører i berøring med systemet blev kortlagt. Med udgangspunkt i de opstillede resultatomål, førte det til en række underliggende fokuspunkter som skulle imødekommes. Nedenfor gennemgås de vigtigste overvejelser og konklusioner i dette arbejde. Resultatomålene *Udvikling af optimeret batteriteknologi* og *Undersøgelse af autonom control logic i brugskonteksten* viste sig i praksis at være tæt koblete og derfor behandles de i det følgende afsnit samlet.

6.1 Udvikling af optimeret batteriteknologi og undersøgelse af autonom control logic i brugskonteksten

Batteriets kapacitet skulle imødekomme strømforbruget ved løft af diverse laster og brugsmønstre. Derfor blev der gennemført en analyse af vægten af gængse laster samt hvor stor en andel af det samlede behov hver type last udgør, jf. Bilag 1. Samtidig blev der lavet et estimat af hvor stort strømforbruget ved enkeltstående men hyppigt forekommende spidsbelastningshændelser er, eksempelvis en lastbil fuldt læsset med paller med teglsten som skal læsses af førend systemet har mulighed for at søge til docking. Endelig blev der lavet iagttagelser omkring arbejdets tilrettelæggelse og udførsel hvor særligt pauser imellem kranaktivitet kan bruges til opladning af systemet. Det var på forhånd tesen at brugsmønstrene ville være afhængige af den konkrete sag. Dette viste sig dog ikke at være tilfældet, idet der tegnede sig et billede af at klargøring udgør en væsentlig del af den samlede aktivitet på tværs af forskellige entrepriser. Dette var en interessant erkendelse fordi det førte til den konklusion at opladningsstrategien i vid udstrækning kunne basere sig på muligheden af at oplade i løbet af en arbejdsdag og ikke kun om natten. Det gav derfor i højere grad mening at lade dimensionering af batteriets kapacitet styre af enkeltstående spidsbelastningshændelser frem for strømforbruget over en hel dag.

Med afsæt i analysen over gængse laster blev der således taget udgangspunkt i en repræsentativ spidsbelastningshændelse, at en lastbil med paller med teglsten skal hejses på plads. I FIGUR 7 ses en enkelt palle med teglsten der vejer 730 kg. Der kan som udgangspunkt være 33 paller på en fyldt lastbil.

Klargøring udgør en væsentlig del af den samlede aktivitet på tværs af forskellige entrepriser.

7. EUR-PALLET LOADED WITH ROOF TILES



EUR-pallet loaded with 252 roof tiles.

2,8 kg per roof tile
EUR-pallet = 25 kg
Total = 2,8 kg x 252 + 25 kg = **730,6 kg**

14 %

of the loads
on a typical
renovation

FIGUR 7. Udklip fra analysen i bilag 1 med billede af palle med teglsten. Angivelse af vægt og estimeret procentvis andel af materialer der løftes på en typisk renoveringsentreprise.

Herefter blev hejsesystemets strømforbrug undersøgt ved direkte måling af trækket på batteriet. I FIGUR 8 ses billeder fra gennemførslen af disse test.



FIGUR 8. Måling af strømstyrke ved løft på intern test set up (tv). Vejecelle anvendes ved test.

Herefter kunne batteriets kapacitet dimensioneres. Det blev antaget at pallerne skulle løftes 16 m fra gadeplan til tag, hvilket vil være dækkende for størstedelen af renoveringsopgaver i Danmark. Et sådan løft tager 1 min og 8 sekunder. I TABEL 3 ses samlet præmisserne for dimensioneringen.

TABEL 3. Præmisser for dimensionering.

Præmisser for dimensionering	Værdi
• Byrdens vægt (en palle med teglsten)	730 kg
• Antal løft (en fyldt lastbil)	33
• Strømstyrke ved løft af byrde (måling)	56 Amp @48V batteri
• Effekt ved løft af byrde	2688 W
• Løftehøjde svarende til løft på tag af en etageejendom på 5 etager.	16 m
• Løftehastighed	14 m/min
• Løftetid (givet ud fra ovenstående)	1 min 8 sekunder (0,019 time)

Dette giver følgende kapacitetskrav udregnet i enhederne watt-timer og ampere-timer

$$Ph = \text{antal løft} \times \text{tid} \times \text{effekt} = 33 \times 0.019 \times 2688 = 1685 \text{ Wh}$$

$$Ah = \frac{Ph}{\text{Spænding}} = \frac{1685 \text{ Wh}}{48 \text{ V}} = 35 \text{ Ah}$$

Ved anvendelse af et batteri på 48V kunne det konstateres at det vil kræve en kapacitet på 35Ah at gennemføre en komplet tømning af en lastbil med teglsten. Hertil bemærkes at varigheden af den samlede løfteoperation har en betydning for hvor stor en andel af batteriets kapacitet der kan udnyttes, samt at batteriets kapacitet, særligt over tid, i reglen ikke kan holde det som angives i databladet. Men den vigtige pointe i projektet var via feltstudier konklusionen af, at det var enkeltstående spidsbelastninger som skulle vægtes i dimensioneringen af batteriets kapacitet.

Et alternativ til en dimensionering af batteriet efter ovenfor beskrevne rationale var at designe systemet med henblik på at batteriet kunne udskiftes, som man kender med andet akku-værktøj. Dermed ville man kunne anvende et mindre batteri, som godt nok krævede udskift, men

Enkeltstående spidsbelastninger skal særligt vægtes i dimensioneringen af batteriet.

potentielt gjorde at kapaciteten kunne tilpasses på konkrete sager efter behov. Fordele og ulemper blev afvejet og konklusionen var at en løsning med kun ét batteri var at foretrække fordi brugsmønstret med spidsbelastninger ville kræve at der skulle udskiftes batteri undervejs i en aflæsningssituation hvilket ikke er hensigtsmæssigt. Derudover var det et afgørende argument, at hejsen sidder i stilladsets tag, hvor der i reglen ikke er åbent for adgang for håndværkere. Her skal man have stilladsmontør uddannelse for at bevæge sig op. Dette vil komplicere hele batteriudskiftningen markant fordi stilladsmontøren typisk kun er til stede ved opsætning og nedtagning af stilladset og ikke under selve gennemførslen af entreprisen.

6.1.1 Særlige krav til batteriet

Generelt er det muligt at købe industribatterier med datakommunikation. Men i det konkrete tilfælde var der særlige krav til batteriet som gjorde det vanskeligt. For det første var der kravet om at kunne aflade batteriet mens det var i dock, hvilket er nødvendigt fordi elektronikken i systemet stadig bruger strøm mens opladningen er i gang. Hertil kom behovet for at benytte et batteri med relativ høj kapacitet, som beskrevet i afsnit 6.1 ovenfor. Endelig var der det forhold at systemet i praksis skulle kunne fungere i kolde temperaturer, både i forhold til opladning og afladning.

Kravet til datakommunikationen var baseret på behovet for at kende primært 3 parametre om batteriets aktuelle tilstand. Det ene var i forhold til opladningsgraden (SoC) som skulle bruges i logikken for autonomi. Dernæst var der viden om hvorvidt batteriet rent faktisk lader. Dette var vigtigt for at sikre at der ikke opstår fejl hvor systemet er kørt i dock men alligevel ikke lader, hvad enten det skyldes en menneskelig fejl, f.eks. at opladeren ikke er forbundet til strømstikket eller en defekt på den mekaniske docking. Under alle omstændigheder ville det resultere i nedetid og produktionstab i stedet for det modsatte. Endelig var der information om temperatur som skulle bruges for at sikre at batteriet ville fungere hensigtsmæssigt særligt ved kolde temperaturer.

Et punkt for en tilfredsstillende løsning var indenfor projektperioden eller i umiddelbar forlængelse heraf at batteriet skulle kunne modnes tilstrækkeligt til at det produktions- og prismæssigt kunne være klar til den kommende kommercialisering. Dette førte i projektet til nogle interessante afvejninger af om den ønskede funktionalitet skulle udvikles i samarbejde med en batteriproducent eller om funktionaliteten skulle forsøges realiseret ved et "add-on" system som kunne fungere ved siden af en af de gængse batterityper, således kravene samlet set blev imødekommet. Det var vurderingen at fordelene ved at udvikle batteriet sammen med en producent ville være, at den specifikke funktionalitet som ønskedes udviklet, i højere grad kunne integreres med selve batteriet, så man ville få én samlet løsning. Omvendt var det vurderingen at ulemperne ved denne fremgangsmåde ville være at projektet gjorde sig afhængigt af, at dette samarbejde lykkedes og at løsningen derefter nødvendigvis vil kræve præcis denne modificerede type batteri. Dette ville ikke være hensigtsmæssigt i forhold til den generelle udvikling af batterier, hvor pris og performance løbende forbedres og det ville således være en fordel på længere sigt at kunne vælge mere frit imellem producenter og batterityper.

Da der var stærke argumenter både for og imod, blev det i projektet besluttet at forfølge en plan A der gik på at udvikle batteriet med en producent, men samtidig at gennemføre nogle tiltag der gjorde det muligt at skifte spor ved at inkludere elementer fra plan B i udviklingsarbejdet. Inden dette arbejde kunne udfolde sig, skulle der dog vælges en konkret batteri type. Ret hurtigt konvergerede valget sig ned til to typer nemlig lithium-Ion (Li-Ion) eller lithium-jern-fosfat (LiFePO₄). I TABEL 4 ses værdier for typiske egenskaber ved de to typer.

TABEL 4. Sammenligning af parametre for hhv. Li-Ion og LiFePO₄.

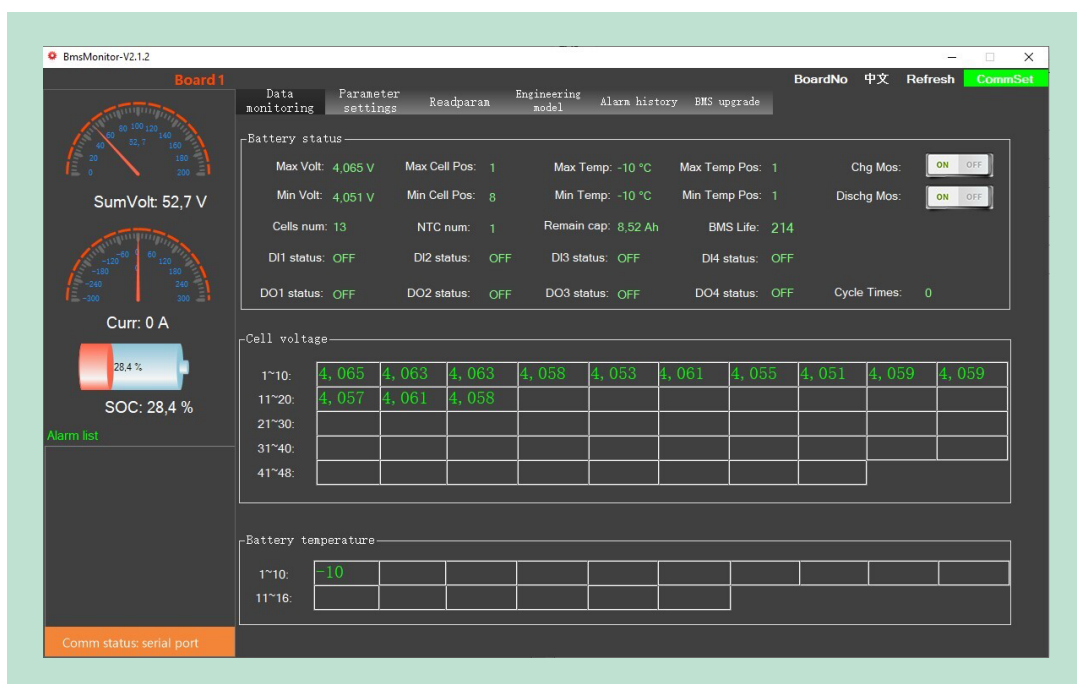
Typiske egenskaber ¹	Li-Ion	LiFePO ₄
Specifik energi	100-265 Wh/kg	90-160 Wh/kg
Energi densitet	250-693 Wh/L	325 Wh/L
Specific effekt	250-340 W/kg	200 W/kg
Antal ladecykler	400-1200	2750-12.000

Det var vurderingen at lithium-jern-fosfat i mange henseende ville være et fordelagtigt valg. Særligt grundet dets lange levetid og mulighed for mange ladecykler. Dertil kom at det er mindre følsomt for frost hvilket er vigtigt fordi Conhoist systemet anvendes udendørs året rundt. De afgørende forskelle som gjorde udslaget i beslutningen, var dog den specifikke energi og energi densiteten. Disse parametre udtrykker hvor meget energi der kan lagres pr vægtenhed og pr volumenhed og altså dermed vægten og størrelsen af et batteri ved en given kapacitet. Feltstudier ved stilladsudlejere og producenter havde vist at størrelse og vægt betyder meget fordi arbejdet som stilladsmontør med at håndtere grej er enormt hårdt. Et konkret eksempel der nævntes af en producent, var en ny materialehejs som blev lanceret på markedet. Når den var sat op, fungerede den upåklageligt for de primære brugere (håndværkere), men den var uhåndterbar og tung for stilladsmontørerne og derfor blev den valgt fra og i sidste ende var det en alternativ konkurrerende løsning som vandt markedet. Grundet behovet for relativ høj kapacitet kombineret med lav egenvægt og kompakt design faldt valget derfor på at vælge batteritypen baseret på Li-Ion teknologien.

Udviklingen fortsatte således af et spor baseret på Li-Ion batterier, hvor den ønskede funktionalitet blev integreret i batteriet. Det lykkedes at etablere et fornuftigt samarbejde med en Kinesisk batteriproducent, men det skal bemærkes at udviklingstiden til tider var træg og kommunikationen ikke altid let. Konkret var det erfaringen at anvendelsen af billeder, grafik og i det hele taget visuelt materiale fungerede langt bedre end udelukkede at holde specifikationer i tekst format. I FIGUR 9 ses et billede af grafisk interface til datakommunikation, som muliggjorde at kende batteriets grad af opladning (SOC) samt hvornår batteriet reelt blev opladt. Endvidere blev der integreret en elektrisk varmemåtte i batteriet, som kunne aktiveres ved lave temperaturer således opladning kunne lade sig gøre selv i frost vejr.

Feltarbejde viste at uhåndterbare og tunge løsninger bliver valgt fra selvom de fungerer for de primære brugere.

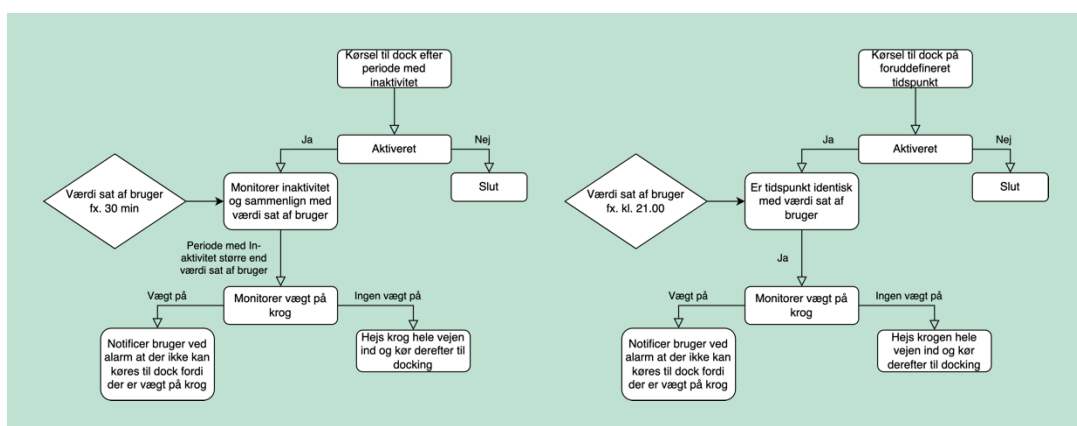
¹ https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium_iron_phosphate_battery // https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-ion_battery



FIGUR 9. Billede af interface til datakommunikation med batteriet.

6.1.2 Logik for autonom docking

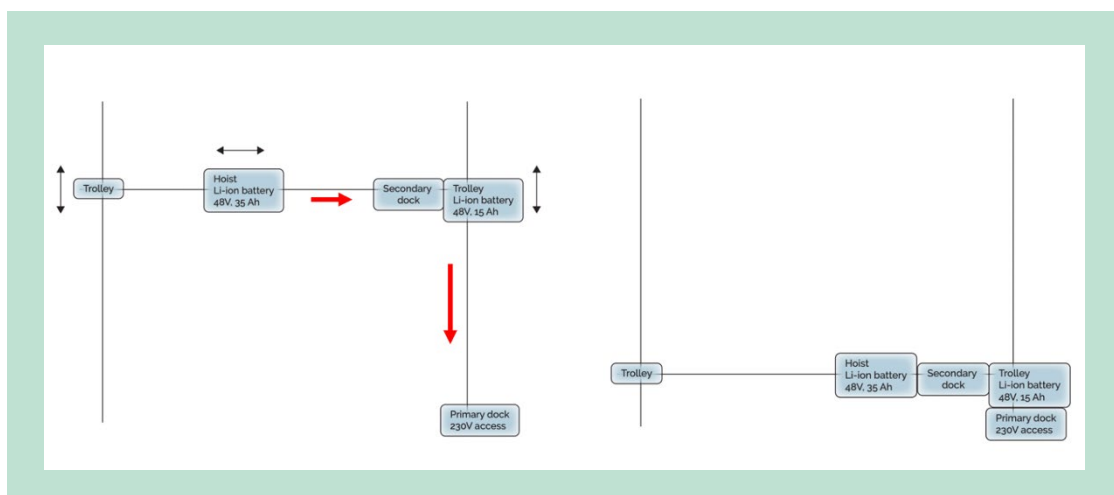
Feltarbejde og brugerinvolvering førte til behovet for at kunne tilpasse logikken for autonomien. De overordnede tilkendegivelser var at det i nogle situationer ville være irriterende hvis hejsen hele tiden kørte i dock, mens det for andre vægtedes højere at batteriet altid var fuldt ladet op. Designarbejdet blev som beskrevet tidligere gennemført iterativt med forskellige modeller som kunne afprøves på brugerne for at få kortlagt styrker og svagheder. Hertil kom overvejelse om sikkerhed. Sikkerhed var et fokusområde i sig selv og der blev brugt en del ressourcer på dette. Den endelige logik for autonom af docking blev udfoldet i et diagram, der viser udfaldsrummene i forskellige situationer, se FIGUR 10. Her ses, at man kunne aktivere to logikker som både kunne fungere samtidigt eller hver for sig afhængigt af behovet. Den ene var en aktivering efter en vis periode med inaktivitet, mens den anden var en aktivering på et foruddefineret tidspunkt. Begge logikker indeholder et sikkerhedstjek af om der var vægt på krogen inden den autonome kørsel blev igangsat. Dette var en vigtig forudsætning for at kørslen kunne gennemføres sikkert. Undersøgelsen viste at det med denne enkle konfiguration var muligt at imødekomme alle de scenarier Conhoist skulle fungere i.



FIGUR 10. Der blev anvendt to logikker for autonom docking som hver kunne fungere for selvstændigt eller være aktiveret på samme tid.

6.2 Mekanisk design af docking

Forud for det mekaniske design af docking skulle det fastlægges hvor der rent fysisk i produktarkitekturen skulle være placeret batterier. Systemet havde 3 enheder som brugte strøm jf. FIGUR 3, nemlig to trolley moduler og hejs modulet. Det var på forhånd givet at der skulle være et batteri i hejs modulet nødvendiggjort af dets høje strømforbrug. Der blev med udgangspunkt heri overvejet 3 muligheder. Den første mulighed var at hvert modul havde sit eget batteri, hvilket ville medføre at systemet skulle have 3 selvstændige batterier. Den anden mulighed var at trolley modulerne deltes om et batteri og hejs modulet havde sit eget batteri. Den tredje mulighed var at der kun var placeret et batteri i hejsen, hvorfra trolley modulerne så skulle forsynes via ledning. Den sidste mulighed havde dog den afgørende ulempe at hejsen bevæger sig relativt i forhold til trolleyerne hvilket medførte at der ville opstå behov for kabeltromler eller guirlande-løsning. Dette ville besværliggøre opsætningen og potentielt skabe udfordringer med ledninger der bliver kludret sammen og medfører nedetid på systemet. Dermed var der reelt to løsninger tilbage, enten at have 3 batterier, en i hvert modul, eller at have 2 batterier, hvor trolley modulerne skulle deles. Selvom der var fordele og ulemper ved de to, var det vurderingen at de var omtrent lige velegnede. Det blev besluttet at fortsætte med en løsning baseret på 2 batterier, men med mulighed for at udvide, hvis det skulle vise sig nødvendigt. Arkitekturen kom derved til at se ud som vist i FIGUR 11. Som det ses, skulle systemet køre i docking to steder for at oplade batteriet i hejs modulet. Dette understregede vigtigheden af at kunne realisere en robust docking station til formålet.



FIGUR 11. Tv.: Systemet ses i en situation hvor det er på vej til dock. De røde pile viser kørselsretning for at konnekttering realiseres. Th.: Systemet er kørt i dock og begge batterier kan oplades.

Herefter kunne forskellige principper for den konkrete udformning af docking stationen udfoldes. Da trådløs docking i større og større omfang ses anvendt i autonome elektriske maskiner, blev denne måde at oplade et batteri på undersøgt. Efter at have været i dialog med en række producenter af trådløs opladningsteknologi var det dog vurderingen at løsningerne ikke i tilstrækkeligt omfang var modne. Konkret var udbuddet af løsninger, der opfyldte effektkrav, CE-godkendelser mv. for begrænset. Det blev derfor besluttet at fokusere på en løsning med elektrisk konnekttering. Det særligt udfordrende ved at lave et godt system for docking var brugskonteksten, hvori løsningen skal anvendes, dels fordi udstyret ville få en særdeles hårdhændet behandling, dels fordi opsætningen er midlertidig og typisk hurtigt etableres, hvilket medfører unøjagtigheder og variationer i stilladsoverdækninger. Derfor var det et krav til udviklingen af docking, at den kunne imødekomme disse særlige forhold som konteksten stiller. I arbejds pakken blev der anvendt en iterativ proces hvor en række alternative løsningsmuligheder er blevet testet og videreudviklet. Dette resulterede i at der blev udviklet en helt ny type docking der opfylder alle de krav til funktionalitet som blev stillet. Særligt, kan fremhæves ved

løsningen er at den er utrolig robust, giver sikker konnektering samt at den på en smart måde kompenserer for de unøjagtigheder der er i skinne og stilladsopsætningen. De grundige tests som blev lavet, viste at der hver gang blev etableret forbindelse til opladning og præmissen for et vellykket autonom docking systemet var dermed på plads.

7. Arbejdspakke 2 - Udvikling af vision baseret sway control

Projektet havde på forhånd defineret et konkret middel, nemlig vision teknologi, til at bidrage til at opnå den ønskede effekt i form af minimering af svingende laster. Ved projektstart var første opgave en indledende undersøgelse af kravene til løsningen. Denne blev gennemført med et åbent mindset i forhold til at skabe de bedste forudsætninger for at opnå den ønskede effekt. Og i den proces viste det sig at vision teknologi ikke var den mest egnede teknologi. Derfor blev der i projektet valgt at fokusere på et alternativt løsningsspor. Dette vil blive beskrevet i mere detalje i de kommende afsnit. I TABEL 5 ses arbejdsprogrammets resultatmål med uddybende forklaringer. De to første omhandler forundersøgelser og bliver derfor afrapporteret samlet ligesom de to sidste, der omhandler udvikling, bliver afrapporteret samlet.

TABEL 5. Resultatmål for udvikling af optimeret batteriteknologi.

Resultatmål for arbejdspakke 2	Forklaring
• Forundersøgelse af krav til algoritme	Målet med forundersøgelsen var ved on-site byggeplads besøg en kortlægning af hvordan svingninger af byrder typisk opstår med særligt fokus på hvilke eksterne faktorer der kunne igangsætte svingninger, f.eks. vind i forhold til svingninger opstået ved kørsel med systemet.
• Undersøgelse af vision baseret positionering (bestemmelse af position)	Vision er en velafprøvet teknologi til at bestemme positionen af objekter men i enhver konkret situation kan der være omstændigheder der komplicerer anvendelsen og stiller særlige krav til en vellykket implementering. Målet med undersøgelsen var derfor en kortlægning af disse forhold.
• Udvikling af control logic.	Logikken for svingningskontrollen skulle først og fremmest basere sig på de forudgående undersøgelser, men også basere sig på hvad der teknisk viste sig at være den mest effektive måde at opnå resultater. Arbejdet byggede derfor ovenpå det tekniske system såvel som den konkrete kontekst.
• Udvikling af algoritme til minimering af svingning, samt sensorsystem og feedback loop.	Målet var at udvikle en konkret algoritme og et sensorsystem således feedback kunne bruges til at minimere svingninger ved løft og transport af diverse laster.

7.1 Forundersøgelse af krav til algoritme og undersøgelse af vision baseret positionering (bestemmelse af position)

Undersøgelsen blev gennemført ved en række besøg på byggepladser samt interviews af diverse aktører. På en af sagerne blev Conhoist's eksisterende løsning anvendt hvilket gav mulighed for at undersøge hvordan forskellige byrder opfører sig når de bliver løftet. På de resterende sager var dette ikke tilfældet og der blev i stedet fokuseret på typen af byrder der skulle håndteres samt eksterne faktorer der kunne forårsage svingende laster.

7.1.1 Svingende laster

En række gængse faktorer, som kan resultere i svingende laster, var på forhånd kendte fra faglitteratur mv. Det drejer sig f.eks. om eksterne faktorer som vind samt faktorer der knytter sig til brugen under kørsel, eksempelvis når der accelereres eller decelereres. Men i hvilken grad og hvorvidt alle disse faktorer gjorde sig gældende under overdækningen var en vigtig del af undersøgelsen. Derudover var det interessant at se om der ville være uforudsete faktorer som skulle tages i betragtning. I det følgende gennemgås de vigtigste fund i dette arbejde.

7.1.1.1 Vindlast

På trods af at det på forhånd var forventningen at vind ville være en væsentlig faktor, så viste feltarbejdet at dette ikke var tilfældet. Alle stilladsoverdækninger er bygget op med vindskærmende stilladsdug på alle lodrette flader (se billedet i FIGUR 15 længere nede). Disse virker overraskende godt til at dæmpe vindpåvirkningen og på trods af, at flere af byggepladsbesøgene blev gennemført på dage med kraftig vind, så var det ikke en faktor som spillede en rolle i forhold til svingninger når byrder blev løftet. Dette var en gennemgående konklusion i de tilfælde hvor løsningen skulle bruges i den fulde traverskonfiguration under overdækninger. En undtagelse var i de situationer hvor systemet skulle bruges til facademontage. Her er der typisk ikke noget til at skærme for vinden og svingende laster kan udgøre et problem. Et eksempel ses på billedet i FIGUR 12, hvor vinduer skal hejses på plads. Her kan vindstød dels få vinduerne til at svinge, dels få dem til at rotere. I begge tilfælde potentielt med det resultat at vinduerne bliver beskadiget så de må kasseres.



FIGUR 12. Facademontage af vinduer. I denne type montagesituation kan vind udgøre et problem i forhold til at styre vinduerne.

7.1.1.2 Acceleration/Deceleration

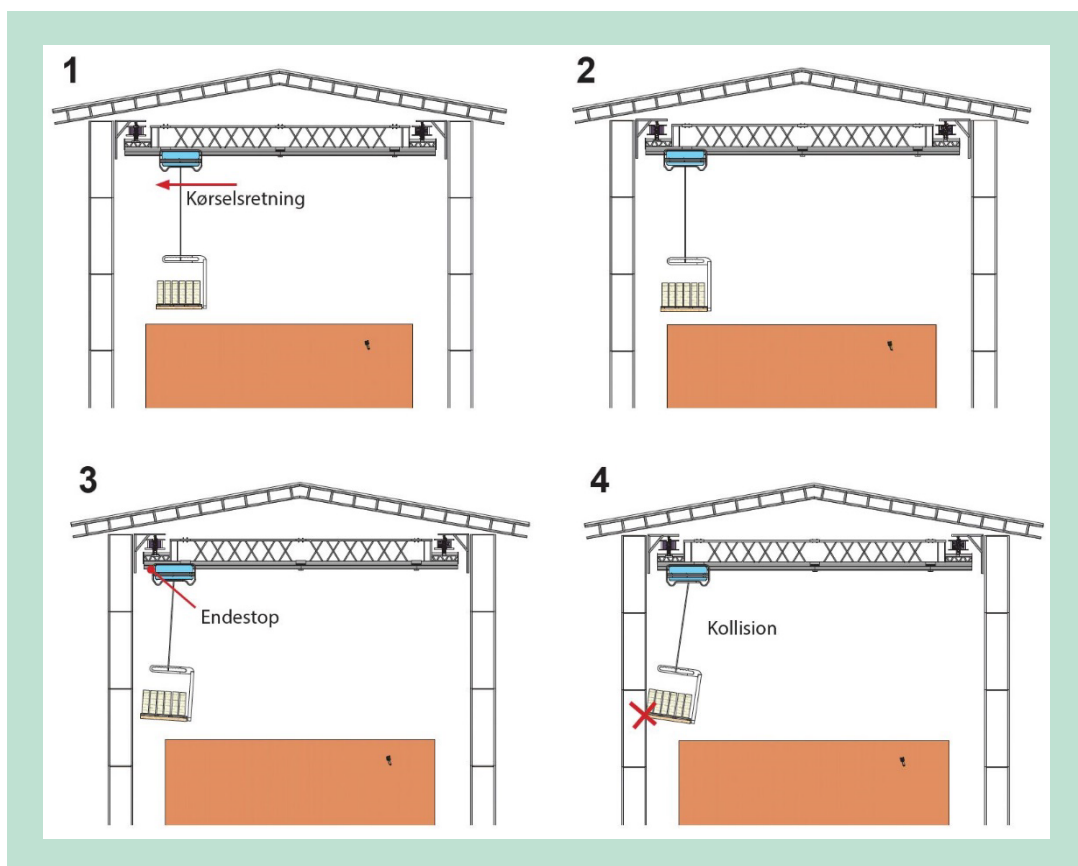
Når der køres med systemet, vil accelerationer og decelerationer som udgangspunkt forårsage svingninger af lasten. Dette sker mere eller mindre konsekvent og det er derfor vigtigt at kunne imødekomme. Problemet har særligt indflydelse på effektivitet, idet brugeren af kranen potentielt skal vente på at svingningerne aftager inden montage/afsætning af byrden kan foretages.

7.1.1.3 Kørsel mod endestop

Ved kørsel mod endestop bliver hejsten potentielt bremsset med kort bremselængde, hvilket kan resultere i kraftige svingninger af byrden. Denne type svingninger var særligt vigtige at imødekomme, dels fordi svingningerne kan være relativt kraftige, dels fordi de potentielt kan forårsage farlige situationer. I FIGUR 13 er den potentielt farlige situation illustreret, hvor en

Stilladsdug virkede overraskende godt til at dæmpe vind og det var en gennemgående konklusion at vind ikke udgjorde nogen væsentlig faktor i forhold til svingende laster.

byrde flyttes ved kørsel af hejsen imod et endestop. Idet hejsen rammer endestoppet vil det få byrden til at svinge og potentielt kollidere med den bærende del af stilladskonstruktionen.

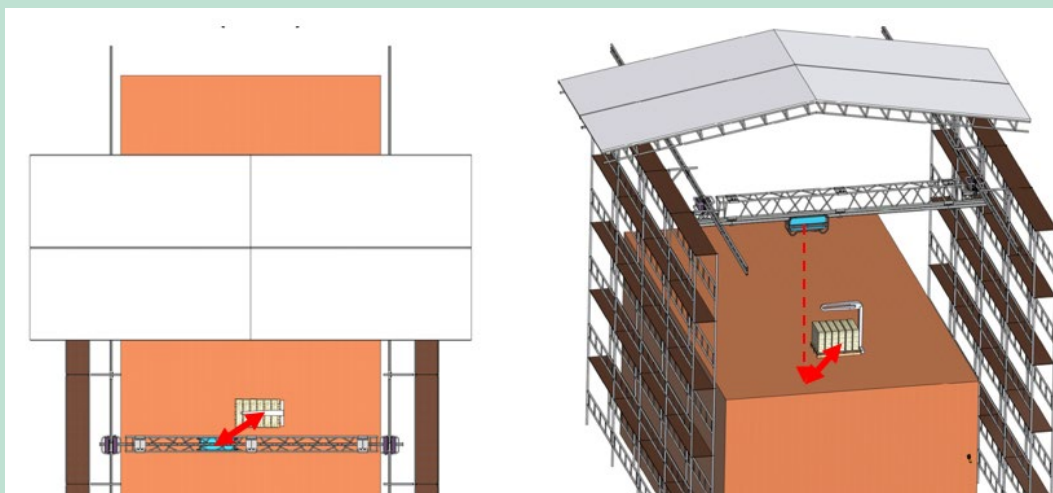


FIGUR 13. Illustration viser hvordan kørsel mod endestop kan skabe farlige situationer idet lasten kan svinge ind i den bærende del af stilladskonstruktionen.

7.1.1.4 Decentreret byrde

Decentreret byrde var ikke en faktor der på forhånd var kendt, men viste sig tydeligt ved observationer af konkrete brugssituationer. Denne faktor opstod stort set konsekvent når en byrde skulle løftes fordi kranen i reglen yderst sjældent er positioneret lodret over byrden. I FIGUR 14 ses en illustration af en sektion af en overdækning med Conhoist samt tagflade og en byrde der skal løftes. Ved hejsning vil byrden, idet den slipper underlaget, svinge mod lodret placering under hejsen. Dette kan føre til farlige situationer hvor bygningsdele og potentielt brugere af hejsen kan blive ramt af en svingende byrde. Da svingningerne opstår ret pludseligt og byrdens vægt kan være relativ høj, var det vurderingen at denne type svingninger var vigtige at imødekomme i det senere udviklingsspor.

Decentreret byrde var en faktor der stort set konsekvent skabte svingende laster og blev derfor vurderet vigtig at imødekomme



FIGUR 14. Decentreret byrde er når byrden ikke er placeret lodret under hejsen. Ved hejsning vil byrden, idet den slipper underlaget, svinge mod lodret position under hejsen.

7.1.1.5 Øvrige faktorer

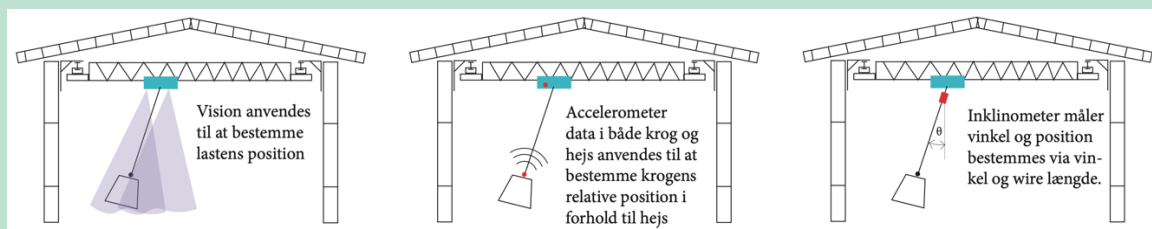
Blandt øvrige faktorer blev iagttaget at korrekt anhugning, dvs. måden hvorpå man fastgører løftestropper og krog var vigtig for at undgå svingninger. Hvis en spærkonstruktion f.eks. anhugges skævt, vil den potentielt komme i svingninger når den løftes fra underlaget. Ligeledes blev det iagttaget at laster, hvis tyngdepunkt kan forskyde sig undervejs i løftet, kan give anledning til svingninger. Dette kan f.eks. opstå med en kasse hvori der ligger løsdele som kan forskyde sig ved mindre accelerationer. For begge disse faktorer var det konklusionen, at løsningen primært skulle findes ved korrekt klargøring af byrde inden løft og korrekt anhugning, jf. gældende retningslinjer og regler for området. Men det var samtidig en konklusion, at det ville være fordelagtigt at systemet kunne, omend ikke forebygge sådanne hændelser, så i hvert fald kunne reagere på dem, så brugeren kan alarmeres og en potentiel farlig situation afværges.



FIGUR 15. På billedet ses Conhoist på det site hvor der blev lavet iagttagelser af faktorer der kan resultere i svingende laster. Som det ses, er sitet pakket ind i vindskærmende stilladsdug og vind er derfor ikke en væsentlig faktor i den sammenhæng.

7.1.2 Bestemmelse af lastens position

Efter at have kortlagt de faktorer der havde relevans for den konkrete brugskontekst samt deres betydning, blev undersøgelsen fokuseret på tilgængelige midler som kunne anvendes til at mitigere eller helt eliminere problemerne med svingende laster. Dette arbejde blev indledt med et åbent mindset for senere at kunne vælge den bedst egnede strategi og teknologi til formålet. Et vigtigt skridt i udviklingen af en god samlet løsning var at opnå en præcis bestemmelse af lastens position. Her var vision teknologi på forhånd en mulighed, da den var velafprøvet i mange andre applikationer. Derudover blev der via desktop research, idesessioner og interviews etableret yderligere to overordnede teknologiske koncepter til at bestemme lastens position. Det ene alternativ baserede sig på accelerometre placeret i hejsen og krogen, mens det andet baserede sig på et inklinometer på wiren. Nedenfor er de 3 koncepter illustreret.



FIGUR 16. Tre koncepter til bestemmelse af lastens position, hhv. (1) vision, (2) accelerometer data, (3) inklinometer.

Til at støtte valget af koncept for bestemmelse af position blev der etableret kriterier som koncepterne kunne vurderes ud fra. Kriterierne vil i det følgende kort blive motiveret.

- **Pris:** Hvad løsningen koster at anvende i en serieproduktion, dvs. når produktet kommer på markedet.
- **Kompleksitet:** Med kompleksitet vurderes hvordan samspillet af eksterne faktorer i brugskonteksten kan påvirke konceptets virkningsfuldhed.
- **Robusthed:** Evne til at modstå de hårde fysiske belastninger som det udsættes for særligt i transport og håndtering
- **Strømforbrug:** Da løsningen er batteridrevet spiller dette en rolle, særligt i brugsscenarier med relativt meget vandret transport i forhold til vertikale løft, hvor motoren til hejsen vil være den dominerende strømsluger.
- **Udviklingsbehov:** Hvor meget tilpasning/udvikling kræves for at tøjle teknologien til den konkrete applikation.

I TABEL 6 ses de tre koncepter og den score de fik ud for hvert kriterie. Konceptet med vision teknologi fungerede som reference og scorede derfor 0 i alle kriterier. De to øvrige koncepter kunne herefter score -1 hvis dårligere, 0 hvis samme og 1 hvis bedre end referencen. Som det ses scorede koncept 2 med inklinometer på wire bedre end referencen ud for alle kriterier. Diskussionen i forbindelse med pointgivningen var meget relevant for valget og her kan særligt to forhold fremhæves. Det ene forhold gjaldt kompleksitet. Her var det vurderingen baseret på interview med eksperter, at varierende lysforhold kunne være en relativt kompleks udfordring for vision teknologien. Systemet skulle kunne fungere under overdækninger der kunne være konstrueret af meget forskelligartet materiale med forskellig grad af lysgennemfald. Ligeledes skulle den kunne fungere udenfor i sollys, samt kunne fungere i kunstig belysning. Det var vurderingen at dette kunne blive en udfordring der som minimum ville kræve et stort udviklingsbehov for at tøjle. Det andet forhold som skal fremhæves, var pris. Her blev det estimeret at løsningen med vision teknologi som minimum ville koste en faktor 10 mere end løsningen med inklinometer. Særligt prisen på kameraer samt øvrig hardware, processorer mv til billedbehandling gjorde denne løsning til en omkostningstung løsning. Til løsningens fordel skal dog nævnes at der også blev diskuteret muligheden for at benytte kameraerne til andet end bare

positionering, f.eks. overvågning af byggepladsen og byggeriets fremskridt mv. Dette var dog ikke det primære formål og hvorvidt samme type kamera kunne bruges var også usikkert. Derfor fik denne pointe i mindre grad lov til at påvirke beslutningen. Overordnet blev det derfor besluttet at igangsætte udviklingsarbejdet med fokus på koncept 2 der indeholder inklinometer på wiren.

TABEL 6. Vurdering af de 3 koncepter. Vision teknologi fungerer som reference og derfor får den nul ud for alle kriterier. De to øvrige koncepter kan herefter vurderes og score en +1 hvis de er bedre end reference, 0 hvis samme som referencen og -1 hvis dårlige end referencen.

Koncept	Pris	Kom- pleksitet	Ro- busthed	Strømfor- brug	Udviklings- behov	Samlet score
1. Vision teknologi (reference)	0	0	0	0	0	0
2. Inklino- meter på wire	1	1	1	1	1	5
3. accelero- meter i hejs og i krog	0	0	0	-1	0	-1

7.2 Udvikling af control logic og udvikling af algoritme til minimering af svingning samt sensorsystem og feed-back loop.

Der findes overordnet to generelle principper for styring som kan anvendes til at minimere svingninger i en traverskran som Conhoist. Det ene fungerer uden at anvende information om lastens position til at minimere svingninger, såkaldt open-loop regulering, mens den anden benytter sig af information om hvordan lasten reelt svinger. Denne information føres tilbage til styringen og betegnes derfor closed-loop regulering. Der eksisterer meget faglitteratur indenfor området for den generelle problematik og derfor vil der ikke blive gået i dybden med dette her, men dog blot fremhævet nogle hovedpointer. For open-loop anvendes ofte enten *trajectory planning* eller *command shaping*. *Trajectory planning* er karakteriseret ved at den ønskede bevægelse (forflytning af lasten) i forvejen er kendt og på baggrund heraf kan en optimal forflytning planlægges under hensyntagen til minimering af svingninger. *Command shaping* er en metode der modificerer det input som operatøren af kranen giver via f.eks. fjernbetjening, hvorved svingninger minimeres. *Command shaping* kan derved i modsætning til *trajectory planning* fungere i en realtids-brugssituation. For closed-loop regulering findes der en række forskellige metoder, hvoraf nogle er generiske mens andre er særligt tilpasset konkrete applikationer. Et fællestræk for closed-loop regulering er dog at de som udgangspunkt er langsommere end open-loop, fordi de i deres natur er reaktive. Til gengæld kan de håndtere eksterne påvirkninger, der får lasten til at svinge, hvilket ikke er muligt med open-loop regulering.

Med udgangspunkt i projektets analyse af potentielle faktorer der kunne forårsage svingninger, blev det kortlagt hvorledes tilgængelige metoder bedst muligt kunne udvikles til anvendelse i Conhoist løsning. I TABEL 7 ses de iagttagede udløsende faktorer samt vurdering af hvorledes de bedst kunne imødekommes. Ligeledes ses en prioritering af deres vigtighed.

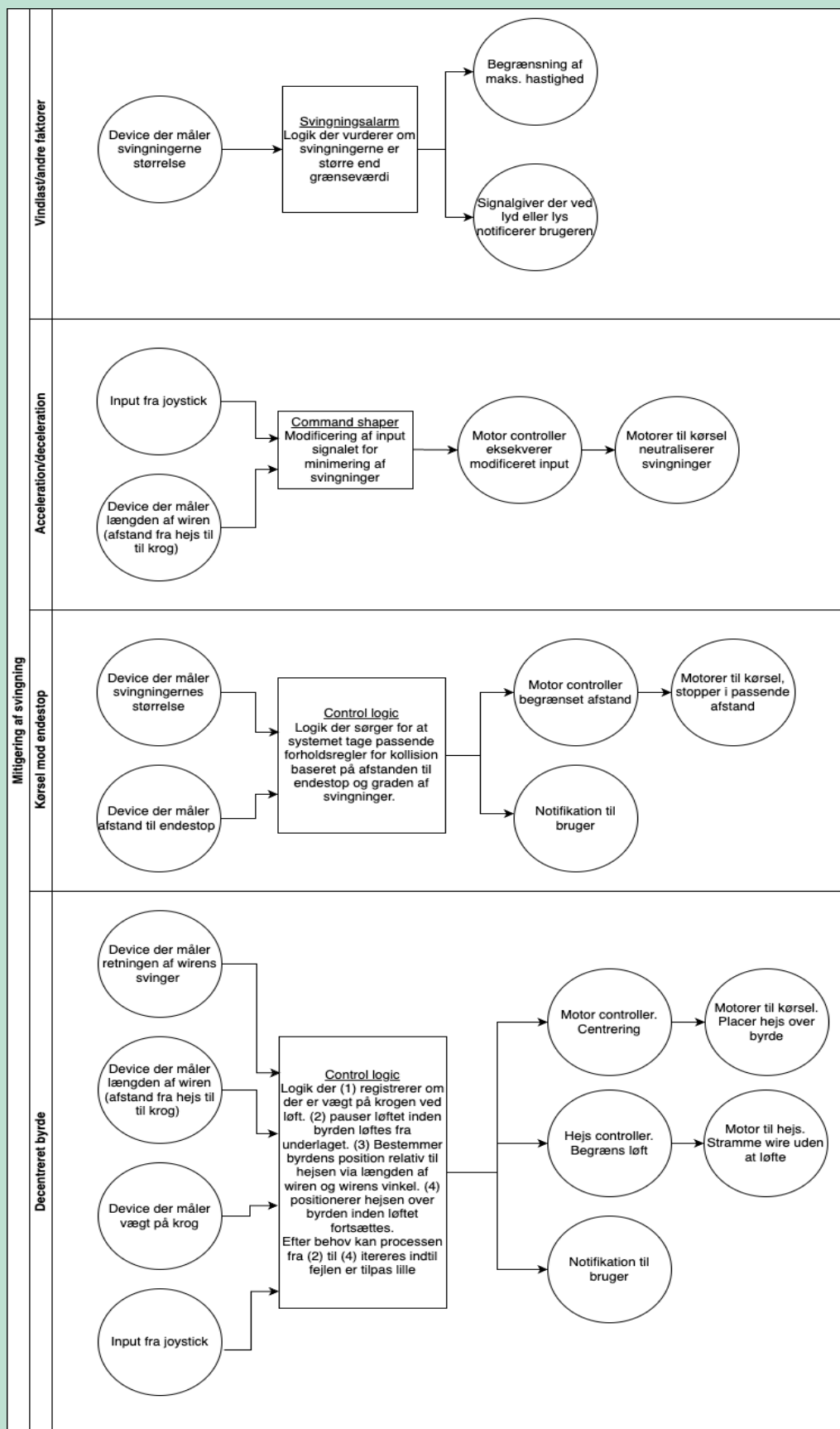
TABEL 7. Faktorer der resulterer i svingninger og hvordan disse kan imødekommes.

Udløsende faktor	Vurdering
7.1.1.1 Vindlast	Feltarbejdet viste at vindlast reelt kun er et problem i den specifikke brugskontekst hvor der ikke er afskærmning med stilladsdug. Dette er relativ sjældent og derfor fik denne faktor lav prioritet . Det blev besluttet at en passende måde at imødekomme problemet på var at inkludere en alarm funktion, der f.eks. via lyd eller lysblink, gør brugeren opmærksom på at lasten svinger. Samtidig kunne systemet sænke den maksimale hastighed til et passende niveau, så det ikke er muligt at køre med fuld fart når lasten svinger mere end en vis grænse.
7.1.1.2 Acceleration/Deceleration	Svingende laster grundet acceleration og deceleration blev i højere grad vurderet at være et problem i forhold til effektivitet end sikkerhed. Det blev vurderet at en passende måde at imødekomme problemet på ville være inkludere en form for open-loop styring, f.eks. command shaping, til at minimere svingninger af laster under kørsel med systemet. Det blev vurderet at være medium prioritet .
7.1.1.3 Kørsel mod endestop	Det var konklusionen at kørsel mod endestop potentielt kunne skabe farlige situationer og derfor fik dette område høj prioritet . En god løsning ville være at detektere afstanden til endestop og samtidig detektere om der var en svingende byrde på krogen. I givet fald skulle systemet tage passende forholdsregler baseret på afstanden til endestop og graden af svingninger. Hvis f.eks. byrden svinger 2 m fra side til side, må hejsen ikke køre tættere på endestop end 2 m. Derved ville der være sikkerhed for at byrden ikke kan kolliderer med den bærende stilladskonstruktion, jf. illustrationen i Figur 13.
7.1.1.4 Decentreret byrde	Decentreret byrde var en faktor der stort set konsekvent udløste svingninger ved hejsning af laster. Når først disse svingninger var introduceret blev byrden ved med at svinge under hele forflytningen. Derfor fik den høj prioritet at løse. En passende løsning ville være at hejsen ved løft selv korrigerede sin egen position så den var lige over lasten inden byrden blev løftet fra underlaget.
7.1.1.4 Øvrige faktorer	De øvrige faktorer knyttede sig særligt til forkert anhugning. En måde at imødekomme dette på var at give feedback til brugeren via lyd eller lysblink at lasten var kommet i svingninger og samtidig sænke den maksimale kørselshastighed indtil svingningerne var aftaget til et rimeligt niveau. Dette var samme løsning som ved vindlast problematikken.

Vurderingen af hvordan de udløsende faktorer bedst kunne imødekommes fungerede herefter som overordnede løsningsstrategier, hvor udviklingen dermed kunne konkretiseres i mere konkrete funktionelle beskrivelser der ville resultere i delsystemer som kunne imødekomme behovet. Dette arbejde forløb i en iterativ proces, der ved systematiske og kreative metoder genererede en række alternative løsninger og konvergerede mod de mest lovende. I FIGUR

17 ses et samlet overblik af de endelige løsninger defineret ved konkrete virkemidler og funktionelle beskrivelser og algoritmer. For hver af de identificerede faktorer, kunne der således udledes et konkret delsystem bestående af devices der typisk kunne være en sensor samt en beskrivelse af hvordan den logiske anvendelse (algoritme) af devices output ville føre til det ønskede resultat. Det bemærkes at løsningsstrategien for vindlast og øvrige faktorer var den samme og derfor behandles de samlet i diagrammet.

Da der var tale om 4 forskellige delsystemer var det ikke realistisk at gennemføre udviklingen af dem alle indenfor projektets rammer. Derfor blev det besluttet at gennemføre den konkrete udvikling af sensorsystem og løsning i den kommende arbejdsplan 3 under hensyntagen til prioriteringen som fremgår i TABEL 7 samt ud fra devisen om at plukke de lavest hængende frugter først. Samtidig blev det prioriteret at tage højde for alle faktorer således løsningen ville blive præpareret og i en senere udgave kunne imødekomme samtlige behov. Som det ses, fik faktorerne **kørsel mod endestop** og **decentreret byrde** høj prioritet. Derfor blev der fokuseret på disse i udviklingen af sensorsystemet i den kommende arbejdsplan 3.



FIGUR 17. Funktionsbeskrivelse af de logikker som blev defineret for at imødekomme identificerede problemer ved svingende laster.

8. Arbejdspakke 3 - Udvikling af positionerings- og navigationssystem

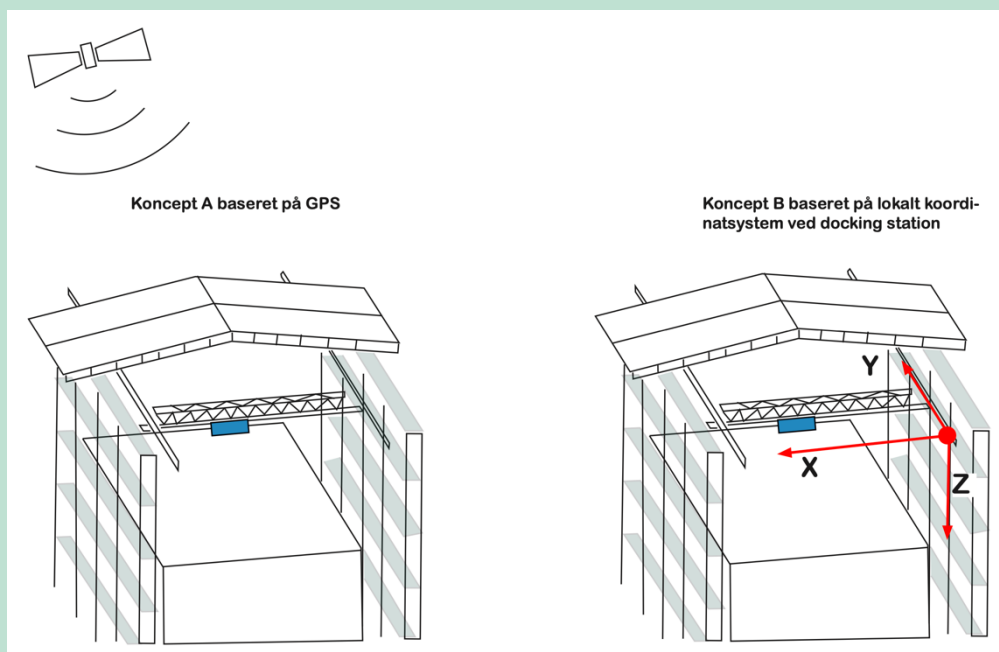
Udviklingen af positionerings- og navigationssystemet skulle imødekomme to overordnede behov. Det ene var behovet for at Conhoist systemet havde en model af den fysiske kontekst den befinder sig i, hvilket var grundlaget for at kunne navigere autonomt. Det andet behov var at løsningen i et vist omfang skulle kunne detektere når den fysiske kontekst ændrede sig og tilpasse sig disse ændringer. Hertil kom at systemets sensorer samtidig skulle kunne muliggøre sway control som beskrevet i arbejdsapakke 2. Samlet var resultatmålene defineret som vist i TABEL 8 nedenfor.

TABEL 8. Resultatmål for udvikling af positionerings- og navigationssystem.

Resultatmål for arbejdsapakke 3	Forklaring
• Sensorsystem til høst af data	Målet med sensorsystemet var dels at kunne opsamle data til positionering og navigering, dels at kunne realisere den ønskede funktionalitet i forhold til sway control.
• Optimering af data og effektivisering af systemets tilgængelighed	Her var målet at verificere og optimere kvaliteten af data ved at teste diverse sensorer, således realiseringen af den ønskede funktionalitet blev muliggjort. Dernæst var det målet på baggrund af data at optimere systemets tilgængelighed for slutbrugeren.

8.1 Sensorsystem til høst af data

Der blev i projektet arbejdet med to koncepter for hvordan Conhoist systemet kunne navigere i brugskonteksten. I FIGUR 18 nedenfor ses illustrationer af de to koncepter. Koncept A var fundet på positionering baseret på GPS. Med denne løsning skulle information om den fysiske kontekst kommunikeres ved GPS koordinater. Et eksempel kunne være at brugeren ønskede at Conhoist skulle køre til en foretrukken position, eksempelvis et hejsefelt hvor materialer kunne løftes op og affald sænkes ned. Dette kunne realiseres ved at kommunikere GPS koordinater til Conhoist. Herefter ville det ikke være nødvendigt for brugeren selv at styre Conhoist hen til hejsefeltet, idet systemet selv kunne finde derhen. Koncept B fungerede ud fra positionering ved et lokalt koordinatsystem defineret ved systemets docking station og de parallelle skinners orientering. Docking stationen ville således fungere som et kalibreringspunkt og systemet skulle herudfra kontinuerligt detektere hvor langt det havde bevæget sig og dermed hvor det befandt sig på hhv. x- y- og z-aksen.



FIGUR 18. Tv.: Koncept A baseret på GPS. Th.: Koncept B baseret på et lokalt koordinatsystem.

Til at understøtte valget af løsningskoncept anvendtes som tidligere en vurderingsmetode hvor referencekonceptet fik scoren 0 ud for alle kriterier og det andet koncept fik -1 hvis dårligere, 0 hvis samme og 1 hvis bedre end referencen. Kriterierne var de samme som tidligere dog blev robusthed udvidet til også at gælde præcision hvilket var vigtigt for funktionens virkningsfuldhed. Derudover blev udviklingsbehov udvidet til også at rumme en vurdering af anvendeligheden.

TABEL 9. Vurdering af de to koncepter for navigering.

Koncept	Pris	Kompleksitet	Robusthed/præcision	Strømforbrug	Udviklingsbehov/anvendelighed	Samlet score
A. GPS	0	0	0	0	0	0
B. Lokalt kalibreringspunkt	0	0	1	1	-1	1

I TABEL 9 ses vurderingerne som blev givet. Som det fremgår blev GPS konceptet vurderet at være stærkere i forhold til kriteriet udviklingsbehov/anvendelighed. Dette skyldtes at der allerede fandtes en del værktøjer hvor GPS blev brugt. Hvis brugeren f.eks. ønskede at definere en favorit position som hejsen skulle køre til, var det relativt enkelt via et "standard" kort at hente GPS positioner for denne lokation. Til gengæld blev konceptet vurderet at være dårligere i forhold til strømforbrug. Dog skal nævnes at strømforbruget af et GPS-modul er så lavt at det i praksis ikke havde nogen betydning i denne sammenhæng. Til gengæld var det vurderingen at robusthed/præcisionen ved GPS ikke ville være tilstrækkelig. Her var det vurderingen at en normal implementering ville give en præcision på +/- 4 m. Og med det forbehold at GPS-signalet kunne blive udfordret af den metalkonstruktion som stilladset består af. Hvis der skulle yderligere præcision ville det kræve en mere omfattende implementering og øge udviklingsbehov og pris. Derfor blev det besluttet at arbejde videre med løsning B der baserede sig på et lokalt kalibreringspunkt defineret ved docking stationen.

Et spørgsmål som rejste sig i arbejds pakken var hvorledes og i hvilket omfang systemet skulle få overført data om den fysiske kontekst på forhånd. Med udgangspunkt i eksemplet hvor brugeren ønskede at definere en lokation for et hejsefelt var spørgsmålet således, hvordan får brugeren kommunikeret denne information til systemet. Umiddelbart var det mest ønskværdigt at kunne gøre det online, det vil sige ved at hejsen var IoT-connected. Dette ville understøtte hele udviklingen indenfor det digitale byggeri og anvendelsen af BIM i alle byggeriets faser. Dermed kunne data fra BIM-modeller kommunikeres til Conhoist systemet, så det fra starten af kendte til den fysiske kontekst og i løbet af byggeprocessen ville blive opdateret med hvorledes byggeriet udviklede sig over tid. For at opnå dette ville det dog dels kræve at hejsen havde et modem så den kunne forbinde til et netværk, dels kræve at der blev lavet en cloud platform for systemet. Altså en hel digital overbygning hvor data kunne kommunikeres imellem cloud og det fysiske system. Det var klart vurderingen at det var der løsningen skulle hen, men også vurderingen at det ikke lå indenfor scope af projektet. Hverken i forhold til økonomi eller tidsplan. Derfor blev det besluttet at fortsætte udviklingen ad et spor hvor denne videreudvikling kunne gennemføres i et senere projekt og således holde muligheden åben, samtidig med at realisere navigationssystemet i en form der kunne fungere uden at systemet var IoT-connected.

I praksis førte dette til at information om kontekst skulle begrænses til et format hvor det kunne kommunikeres på en simple måde via systemets fjernbetjening. Således blev det f.eks. implementeret at et hejsefelt kunne defineres ved at køre hejsen hen til den ønskede lokation. Herefter at definere med et tryk på fjernbetjeningen at denne lokation nu var et hejsefelt. Efterfølgende ville hejsen så selv kunne finde tilbage til denne position uden at brugeren skulle fjernstyre hejsen hele vejen derhen.

8.1.1 Faktorer der skal tages højde for i den fysiske kontekst

Valget af koncept for hvordan systemet skulle navigere havde naturligt en betydning for hvilke sensorer der skulle inkluderes i løsningen. Med positionering relativ i forhold til docking, skulle alle motorer der udfører horisontale kørsel således have encodeere der måler omdrejninger. Samtidig skulle systemets logik holde styr på hvor langt de har kørt og denne data skulle anvendes i de forskellige funktioner. Herudover blev der analyseret på hvilke faktorer der forventeligt skulle tages højde for i brugskonteksten i relation til de autonome funktioner. Den første og vigtigste faktor var selvfølgelig personsikkerhed og derfor var dette et punkt for sig som fik meget fokus. Dette behandles yderligere i afsnit 8.2.

Herudover var det særligt ændringer i stilladskonstruktionen og ændringer af byggeriet som blev overvejet. I forhold til stilladskonstruktionen kan den ændre sig undervejs, hvor typisk stilladsoverdækningen bygges længere. Det var dog vurderingen at så længe broen kunne translater frit i det område af tagkonstruktionen hvor der ikke er ting i vejen, så ville dette ikke give udfordringer. Så længe endestop tilsvarende blev flyttet ville systemet kunne køre længere i samme takt. Til gengæld kunne det give en udfordring hvis dockingstationen samtidig blev flyttet. Dette ville betyde at systemet ikke længere kalibrerede samme sted i forhold til dets nulpunkt. Dette var en vigtig erkendelse for den kunne potentielt komme til at udgøre et problem. Løsningen blev at systemet kun brugte dockingstationen som kalibreringspunkt hvis den lå indenfor en forventet position i forhold til seneste kalibrering. Hvis systemet detekterede at dockingstationen således havde flyttet sig blev de autonome funktioner nulstillet. Det vil sige f.eks. kørsel til et hejsefelt kunne først lade sig gøre efter at positionen for hejsefeltet var blevet indstillet igen.

I forhold til ændringer i byggeriet var det vurderingen at det kunne blive vanskeligt at sikre at den information blev opdateret til Conhoist systemet når det ikke var online. Til gengæld kunne der implementeres en række sikkerhedsfunktioner som ville imødekomme problematikken. En

vigtig af disse var en sikkerhedsfunktion der dels monitorerede lasten på krogen, dels monitorerede vinklen på wiren. Dette blev brugt således at hvis lasten blev forøget mens kørselsmotorerne var aktive (kørte) uden at hejsemotoren var aktiv, så ville det betyde at krogen eller wiren hang fast og derfor skulle kørsel stoppes og brugeren notificeres ved en alarm. Ligeledes hvis vinklen på linen ændrede sig i samme takt som systemet kørte, så ville det betyde at lasten var stødt ind i en forhindring som den ikke kunne komme forbi. Også i denne situation skulle kørsel stoppes og brugeren notificeres med en alarm. Det var således muligt at udvikle systemet med sensorer og passende funktioner der imødekom de udfordringer der var blevet identificeret i den konkrete brugskontekst.

Herefter kunne det samlede sensorsystem udfoldes med de sensorer og devices som var blevet kortlagt. Dette arbejde krævede en del tests og udvikling for at finde frem til den bedste type af sensor og konkrete indbygning. I det følgende vil dette ikke blive uddybet for alle sensorer, men et eksempel bliver givet i afsnit 8.2. I TABEL 10 er resultaterne anført med en forklaring af hvordan der måles og hvad målingen anvendes til.

TABEL 10. Oversigt af de vigtigste sensorer i det udviklede sensorsystem med forklaring til deres funktion.

Sensor/device	Forklaring	Anvendelse
Encoder til motorer	Encoderne registrerer antal omdrejninger på motorerne.	Dette bruges i navigationssystemet til at kende systemets placering relativt til referencepunktet som er dockingsstationen.
Vejecelle	I den konkrete indbygning blev der anvendt en vejecelle der via et vægtstangsprincip kom i tryk, når der var vægt på krogen. Herved kunne kraften måles.	Dette bruges både i forhold til sikkerhedsfunktioner samt sway control jf. FIGUR 17 – Decentreret byrde
Device der måler svingningernes størrelse	Her blev anvendt at Conhoists hejseanordning baserer sig på at linen løber igennem en kasteblok med krog. Dvs. den ene ende af linen er fast monteret. I denne ende kunne derfor monteres et inklinometer som både måler størrelse og retning på svingningerne.	Denne måling var essentiel for mange af systemets funktioner. Det gjaldt f.eks. sikkerhedsfunktionerne såvel som funktioner til begrænsning af svingninger jf. FIGUR 17. Af samme grund var udvikling og test af denne sensor et område der fik særligt fokus i den fase af projektet.
Device der måler længden af wiren	Længden af wiren kunne bestemmes ved hjælp af standard encodeere på hejsemotoren. Det var dog vurderingen at dette ikke ville være tilstrækkeligt fordi kalibrering i tilfælde af power off situationer skulle foretages på ny. Selvom der kunne udtænkes relativt enkle procedurer for kalibrering, ville det ikke være hensigtsmæssigt at brugerne selv skulle være ansvarlige for dette. Derfor blev der som primær sensor anvendt en ekstern absolut encoder der via en gearing kunne måle og "huske" længden på wiren selv i de situationer hvor der ikke var strøm på systemet.	Denne måling var vigtig for en række basale funktioner, bl.a. feedback til brugeren omkring byrdens placering, men den var også en forudsætning for den passive sway control.
Device der måler afstand til endestop	Der blev vurderet på de forskellige teknologier som anvendes i sensorer til afstandsmåling, herunder særligt ultralyd, infrarødt lys og laser. De forskellige typer af sensorer havde indenfor flere kriterier sammenlignelige egenskaber,	Målingen blev brugt i den primære funktionalitet hvor systemet skulle decelerere inden det kom til et endestop. Det var særligt vigtigt når der samtidig var last på krogen idet en svingende last potentielt kunne

men særligt behovet for at måle præcist indenfor et begrænset område gjorde at typen baseret på laser (lidar sensor) blev valgt. Derved var det muligt præcist at måle afstanden til fx endestop, hvis areal var på størrelse med en tekop.

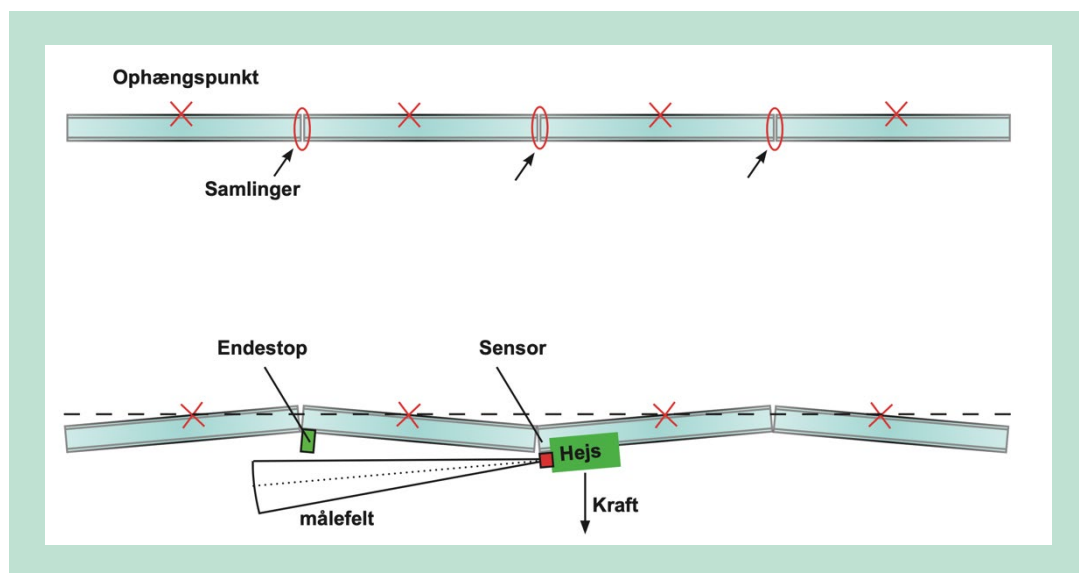
støde ind i stilladskonstruktionen. Se kørsel mod endestop i FIGUR 17.

8.2 Optimering af data og effektivisering af systemets tilgængelighed

En væsentlig del af optimeringen af data bestod i udvikling og test af sensorerne og deres indbygning. Dette arbejde blev gennemført for hver af de sensorer som er listet i TABEL 10. Et eksempel herpå er test af afstandssensor. Først og fremmest skulle den overordnede type bestemmes, hvor valget som beskrevet faldt på en sensor baseret på laser (lidar). Herefter blev der specificeret hvad sensoren skulle kunne. Som så mange andre gange i projektet baseredes dette sig på research af brugsscenarier. For afstandssensoren blev der testet for følgende:

- Sensor placering og betydning af skinnernes relative orientering (kollinearitet)
- Påvirkning af refleksionen fra bl.a. aluminiums skinner
- Sollys indvirkning på målinger
- Sensor indbygning og måling igennem transparent plastplader (til beskyttelse af sensorer)
- Måling ved støv/snavs på sensorplade

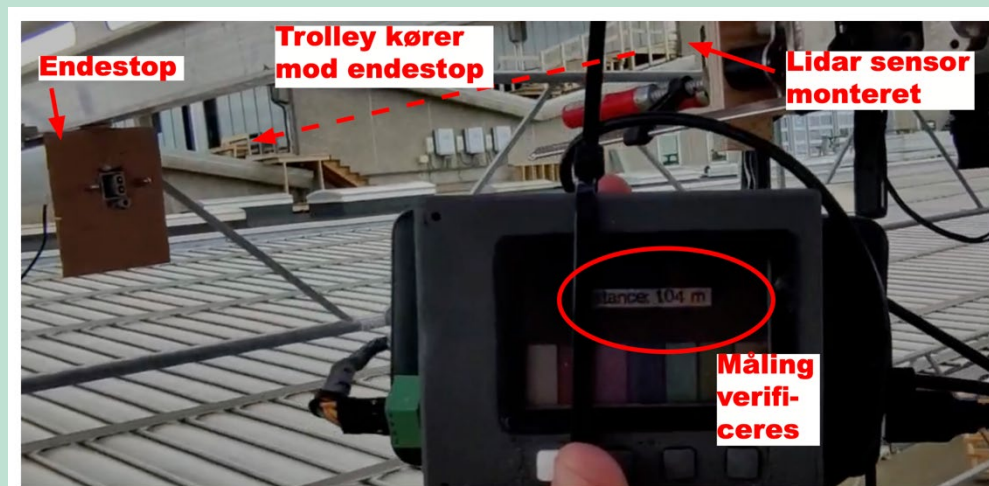
Et godt eksempel på den grundighed der var nødvendig var betydningen af skinnernes kollinearitet (første punkt ovenfor). Skinnerne er koblet i sektioner og det betyder at deres relative orientering ændrer sig en smule når hejs eller trolley med last kører hen over dem. Illustrationen i FIGUR 19 viser dette.



FIGUR 19. Skinnesamling bestående af 4 skinner. Samlingerne kan give sig en smule hvorved skinnernes relative orientering ændrer sig når hejsen kører hen over dem. Dette påvirker retning på sensorens målefelt i forhold til endestop.

Her ses ophængspunkter (røde kryds) og samlinger (røde cirkler). På grund af den kraft som hejsen påvirkes med (fra lasten) og fordi samlingerne kan give sig en smule, vil skinnerne stå i en svag zigzag form idet de roterer omkring ophængspunkterne. Derved ændrer retningen på

sensorens målefelt sig i forhold til endestopet. For at imødekomme dette blev det samlede design inklusiv stivhed i samlinger, størrelse af endestop, placering af sensor og valg af vinkel på sensorens målefelt tilpasset, så et tilfredsstillende resultat kunne opnås. Det lykkedes der- ved at kunne måle den ønskede afstand indenfor +/- 5 mm i op til 5 m fra endestop. Dette var fuldt ud tilstrækkeligt i forhold til de funktioner som sensorens målinger skulle baseres på. I FI- GUR 20 ses billede fra en afsluttende test af afstandssensoren i en 1:1 kontekst der verificere- rede delløsningen.



FIGUR 20. Test af afstandssensor på internt test set-up.

I forhold til delmålet om effektivisering af systemets tilgængelighed blev der særligt arbejdet med 3 konkrete funktioner som kunne bidrage til dette. Her var det tanken at flere funktioner løbende kunne blive koblet på i takt med at systemet og alle komponenter blev verificeret. Samtidig blev der arbejdet med hvorledes sikkerheden i de autonome funktioner kunne opnås. I det følgende bliver nogle hovedpointer fra arbejdet med sikkerhed gennemgået og derefter de 3 funktioner forklaret.

8.2.1 Sikkerhed

En forudsætning for at systemet kunne anvende de autonome funktioner var at sikkerheden var på plads. Til dette arbejde blev forskellige tilgange anvendt. Blandt andet blev eksterne eksperter inkluderet i forbindelse med udarbejdelse af risikovurdering og mitigerende af potentielle farer som kunne opstå. Endvidere blev tilrettelæggelsen og gennemførelsen af grundige test en vigtig forudsætning for at kunne konkludere at systemet var sikkert. Endelig blev der anvendt inspiration fra bilindustrien hvor SAE International har defineret 6 grader af autonomi i selvkørende biler. Disse kan i grove træk forklares som følger²:

- *Level 0 – no automation*
- *Level 1 – hands on/shared control*
- *Level 2 – hands off*
- *Level 3 – eyes off*
- *Level 4 – mind off*
- *Level 5 – steering wheel optional*

Ved de første 3 grader af autonomi er det karakteristisk at det fortsat er føreren der har ansvaret og skal træde til (overtage kontrollen), hvis nogle af de automatiske funktioner fejler,

² https://en.wikipedia.org/wiki/Self-driving_car

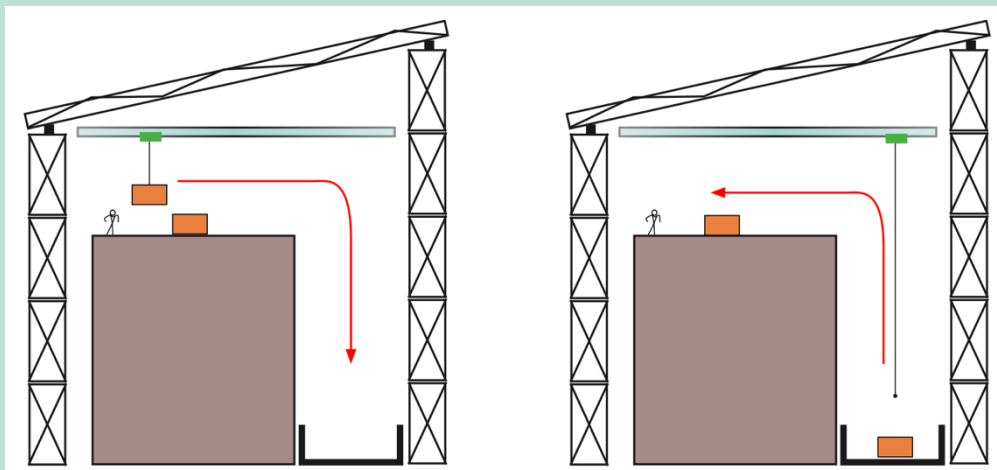
mens systemet på de følgende niveauer reelt overtager styringen. Denne metode tilgang blev anvendt i projektet således at der for hver funktion blev besluttet et passende niveau at implementere autonomi på til en start. Dette muliggjorde at sikkerheden kunne verificeres på en lav grad af autonomi inden systemet kunne opgraderes og i højere grad blive selvkørende. Et behov der opstod ud af denne tilgang, var at kunne opsamle data der kunne bruges til at evaluere på Conhoists historik i forhold til at agere autonomt. Dette var i projektet kun muligt at gøre ved iagttagelser og overvågede tests og derfor blev denne fremgangsmåde benyttet. Det ville dog have været en fordel at kunne logge data automatisk, hvorved man ville få et langt større datagrundlag at konkludere ud fra både når noget ikke forløb som planlagt, men også i forhold til at kunne konkludere hvor mange timer systemet havde kørt uden fejl. Endvidere ville man langt lettere løbende kunne opdatere graden af autonomi i takt med at systemets funktioner blev verificeret. Dette blev noteret som et punkt til mulig videreudvikling af systemet. Det ville kræve at systemet blev IOT-connected, så data kunne sendes til en cloud platform for videre analyse samt at opdateringer kunne sendes retur til systemet. Som beskrevet tidligere var dette out-of-scope i det konkrete projekt, men det var med til at underbygge vigtigheden af at få denne funktionalitet med fremadrettet.

8.2.2 Gøre sig selv tilgængelig efter opladning

Da systemets strategi for batteri kapacitet baserede sig på at kunne lade i løbet af en dag var det vigtigt at brugerne af systemet ikke blev forsinket af manuelt at skulle køre hejsen til det sted hvor der konkret blev udført arbejde fordi systemet var kørt i docking. En måde at imødekomme dette på, var at systemet selv huskede lokationen af det sted hvor det sidst var blevet brugt. Med denne information var det muligt at konfigurere tilgængeligheden afhængig af det konkrete brugsscenariet. F.eks. ville det på visse sager være en fordel at systemet altid returnerede til brugsstedet så snart det var 50% opladt. Dette ville betyde mange mindre ladninger i løbet af en dag uden at brugeren skulle forholde sig til manuelt at køre systemet til opladning eller manuelt at køre det til brugsstedet. Tilsvarende kunne systemet efter fuld opladning, typisk natten over, returnerer til det sted det sidst blev brugt, både for at spare tid men også for at signalere at den var klar til brug. En vigtig konklusion ved denne funktionalitet var at den udelukkende skulle anvendes i situationer hvor der ikke hang nogen byrde på krogen. Dette var vigtigt i forhold til sikkerhedsaspektet, idet der således ikke var fare for at tunge laster stødte ind i personer eller genstande. Derfor blev denne funktion implementeret på et selvkørende niveau, dvs. funktionen krævede ikke brugerens opmærksomhed for at fungere.

8.2.3 Kørsel til prædefinerede destinationer

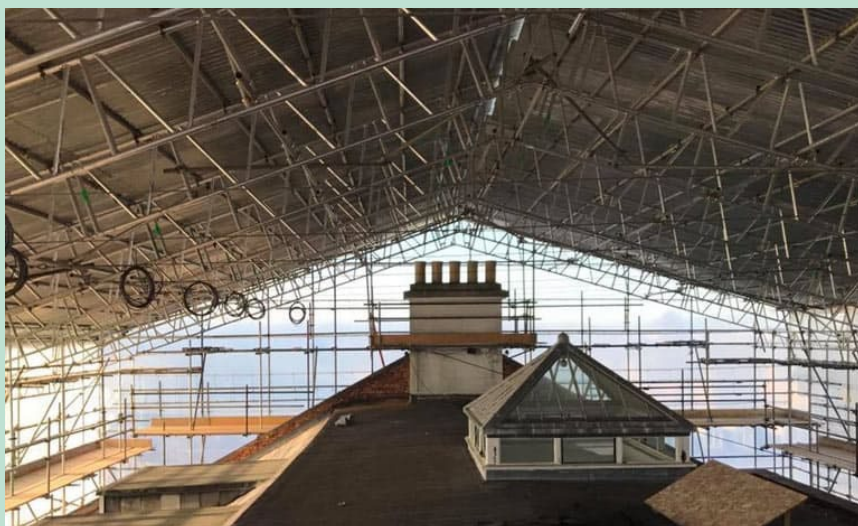
Kørsel til prædefinerede destinationer (lokationer) kunne som tidligere nævnt være til et hejsefelt hvor materialer skulle løftes op eller sænkes ned. Lokationen kunne relativt enkelt kommunikeres til systemet ved at køre hejsen til den position som var ønsket og markere denne position ved et input på fjernbetjeningen. Således kunne en række favoritpositioner defineres og hejsen kunne efterfølgende selv køre derhen. Implementeringen af denne funktion blev differentieret imellem hvorvidt der var last på krogen eller ej. I FIGUR 21 (tv) ses en tung last der skal flyttes ned i en container, dvs. der er last på krogen. I denne situation blev funktionen implementeret på et lavt niveau af autonomi, hvor brugeren for at opnå den ønskede forflytning skulle holde en knap i bund. Dvs. hejsen kunne således selv køre til den ønskede situation uden at brugeren skulle styre den, men brugeren skulle holde en knap nede. Hvis denne knap blev sluppet, ville kørslen stoppe. Derved blev brugerens opmærksomhed fortsat fastholdt på forflytningen og hvis noget uventet opstod, ville brugeren ved at slippe knappen kunne afværge en potentiel uheldig situation. I FIGUR 21 (th) er situationen den, at hejsen uden last blot skal returnere til det sted hvor næste kasse skal flyttes. Da der ikke er last på krogen, er situationen forbundet med en lavere risici. Derfor blev denne implementeret med et højere niveau af autonomi hvor funktionen blot skulle aktiveres. Herefter returnerede hejsen til den ønskede position og i mellemtiden kunne brugeren klargøre lasten eller foretage sig andre opgaver.



FIGUR 21. Tv.: Conhoist flytter en tung kasse fra tagfladen ned i en container på gadeniveau. Th.: Conhoist skal returnere klar til næste kasse.

8.2.4 Forbudte områder

Forbudte områder var en funktion der skulle sikre at laster ikke hejses ind i dele af bygninger som stikker op. I FIGUR 22 ses et billede med et eksempel hvor dele af tagkonstruktionen stikker relativt højt op imod loftet af stilladsoverdækningen. Ved normalt brug vil dette ikke udgøre et problem fordi brugeren vil sørge for at sammenstød imellem last og bygningsdele undgås. Dog vil sådanne situationer i kombination med autonome funktioner kunne udgøre et problem. Derfor blev det undersøgt forskellige måder hvorpå information om bygningens geometri kunne overføres til systemet så systemet på forhånd kendte de (forbudte) områder hvor byrder ikke måtte flyttes. Dette viste sig dog at være en vanskelig opgave at finde gode løsninger på og særligt én udfordring var svær at imødekomme. Dette var det forhold at det i praksis var vanskeligt at finde en god måde at kommunikere data om bygningens geometri, fordi der var tale om information som ikke umiddelbart kunne overføres via fjernbetjeningen. Derfor ville det kræve en omstændig operation, hvor data skulle genereres og overføres til et eksternt hukommelsesdevice f.eks. sd-kort eller usb-stik, for så efterfølgende at skulle overføres til systemet. I nogle situationer kunne dette godt lade sig gøre, men i reglen var byggeriet foranderligt og de forbudte områder ville ikke være statiske men ændre sig i takt med at byggeriet skred frem. Dette ville besværliggøre den fremgangsmåde. Derfor blev det besluttet ikke at forsøge at udvikle en halv god løsning, men i stedet at prioritere løsningen i en fremtidig version af systemet hvor det var on-line og data kunne overføres mere smertefrit. I praksis betød det for specifikke byggesager med spir og udhæng at automatikken i forhold til kørsel til prædefinerede områder ikke kunne aktiveres når der var last på krogen. Til gengæld var det ikke noget problem når der ikke var last på krogen for så kunne krogen bare trækkes helt op i hejsen inden kørsel og ville dermed ikke kunne komme i karambolage med bygningsdele. I forhold til at gøre sig tilgængelig efter opladning var det heller ikke noget problem for i de situationer var der heller ikke byrder på krogen.



FIGUR 22. Billede af stilladsoverdækning hvor bygningsdele stikker op. Kilde: <https://www.ledgerscaffolding.co.uk/temporary-roof-scaffolding/>.

9. Arbejdspakke 4 – Samkørsel af udviklingsspor

9.1 Tilrettelæggelse af arbejdspakken

Fra projektets start havde det været tanken at lave samkørslen på en konkret byggesag. Men i takt med at projektet skred frem stod det klart at det ville give mere mening at gennemføre test i et kontrolleret miljø. Dette ville både gøre det muligt at teste langt mere grundigt og der ville ikke være risici for at arbejdet på et konkret byggeri vil blive sat på pause i den forventelige situation, at der skulle laves tilretninger for at få de forskellige delfunktioner til at fungere i samspil. Derfor blev der bygget et udsnit af en 1:1 overdækning i tro kopi af hvordan det ville se ud på en virkelig case. Denne opbygning ses på billedet i FIGUR 23. Overdækningen var 12x6 m i grundplan og 6 meter i højden.



FIGUR 23. Tv.: Test-opstilling på 12x6 m til test af samkørsel af projektets udviklingsspor. Th.: Conhoist under en konkret afprøvning i færd med at hejse og flytte en stålskulptur.

Herefter blev der lavet en testplan indeholdende alle de scenarier, som systemet skulle fungere i. Desuden blev det fysiske design af Conhoist opdateret i forhold til at kunne inkludere sensorsystem mv. Denne aktivitet var finansieret uden om projektet, men nødvendigt for implementeringen. I denne fase af projektet opstod der nogle nye ideer til den mekaniske konstruktion og opbygning af systemet. Disse ideer viste sig sidenhen at være så interessante at de blev yderligere udviklet og efter projektets afslutning førte de til en patentansøgning som blev indleveret i efteråret 2022. På trods af at udviklingen af den mekaniske konstruktion ikke var finansieret af projektet var ideerne der førte til patentansøgningen et resultat af projektet idet det var afstedkommet af arbejdet med sensorsystemet som netop var et af projektets fokusområder.

Arbejdspakken var i tidsplanen planlagt til 7 måneder, hvilket kom til at stemme fint overens med varigheden af de gennemførte aktiviteter. Ud af denne periode fyldte test og tilpasninger særligt i de sidste 2-3 måneder af fasen.

9.2 Evaluering på mål og succeskriterier

Evalueringen på mål og succeskriterier blev gennemført ved at evaluere på hvert resultatmål inden for arbejdspakkerne. Her henvises til en forklaring af de respektive resultatmål i hhv. TABEL 2, TABEL 5 og TABEL 8. Det kunne derved konkluderes i hvilket omfang målsætningen som defineret ved projektets start var blevet opnået igennem projektet. Endelig blev der overordnet konkluderet på afledte effekter af projektet som ikke fra starten var specificerede målsætninger, men i praksis viste sig at være store gevinster for projektet. Evalueringen ses samlet i TABEL 11. Der ses samlet 10 resultatmål under arbejdspakkerne. Heraf vurderes 8 at være indfriet, mens 2 vurderes at være delvis indfriet. Det var på den baggrund konklusionen, at projektet i høj grad havde nået sin målsætning.

TABEL 11. Evaluering på mål og succeskriterier.

Arbejdspakke/Delmål	Resultatmål	Evaluering
Arbejdspakke 1 / Udvikling af autonomt docking system	Udvikling af optimeret batteriteknologi	Der blev i projektets første fase gennemført et grundigt researcharbejde der kortlagde at enkeltstående spidsbelastningshændelser særligt skulle vægtes i dimensionering af batteriet. Dermed var grundlaget på plads for den tekniske del af udviklingen, som herefter blev gennemført. Den ønskede funktionalitet for batteriet blev udviklet i samspil med en konkret batteriproducent. Fordele og ulemper herved blev belyst og det lykkedes at implementere løsningen på en måde, således batterier fra andre producenter også ville kunne bruges. Dermed blev det undgået at Conhoist løsningen blev afhængig af en specifik leverandør. Overordnet er det vurderingen at resultatmålet blev indfriet til fulde.
-	Undersøgelse af autonom control logic i brugskon teksten	Behovet blev via research kortlagt og der blev på den baggrund udfoldet et diagram der viser udfaldene i forskellige scenarier. Ovenpå dette grundkoncept var det muligt at bygge videre funktionalitet hvilket blev gennemført i følgende arbejdspakker. Resultatmålet blev således indfriet.
-	Mekanisk design af docking	Forskellige overordnede koncepter for docking blev udfoldet og evalueret, og det bedste valgt til videre udvikling. Efter denne proces blev én løsning konstrueret og fremstillet. I testperioden blev docking stationen flyttet rundt og placeret i forskellige ikke-gunstige situationer. Det til trods, fungerede den upåklageligt i alle disse tests. Derfor kunne det konkluderes at resultatmålet blev indfriet til fulde.
Arbejdspakke 2 / Udvikling af vision baseret sway-control	Forundersøgelse af krav til algoritme	Forundersøgelsen blev gennemført ved en grundig research og analyse af alle faktorer der kunne udløse svingende laster. Der blev både gennemført feltstudie på en konkret case, hvor Conhoist blev brugt og på cases hvor Conhoist ikke blev anvendt, men hvor

		konteksten i stedet kunne undersøges. Denne kortlægning gjorde det muligt i senere faser at prioritere og vælge de vigtigste indsatsområder. Det er derfor vurderingen at resultatmålet blev indfriet.
-	Undersøgelse af vision baseret positionering (bestemmelse af position)	Der blev i projektet anvendt en åben tilgang til det overordnede delmål, nemlig bestemmelse af lastens position. Dette førte til at det oprindelige middel <i>vision teknologi</i> viste sig at være mindre egnet end andre virkemidler. Efter en grundig evaluering valgte projektgruppen derfor at fortsætte mod delmålet med den alternative teknologi, nemlig et system der kunne bestemme lastens position ved hjælp af et inklinometer. Det lykkedes med denne teknologi at bestemme lastens position og derfor blev resultatmålet nået, selvom vision teknologi ikke endte med at blive en del af løsningen.
-	Udvikling af control logic.	Der blev udfoldet logikker til imødekomme af alle kortlagte faktorer der kunne udløse svingende laster. Resultatet blev dokumenteret i et overskueligt diagram (FIGUR 17), hvor både de fysiske devices (sensorer mv) samt de funktionelle logikker (input/output) kunne aflæses. Resultatmålet blev derfor indfriet.
-	Udvikling af algoritme til minimering af svingning, samt sensorsystem og feedback loop.	Det var vurderingen at det ville være for omfattende at implementere algoritmer for alle de udfoldede kontrol logikker. Derfor blev der prioriteret, jf. TABEL 7, og to algoritmer blev udvalgt, nemlig algoritme for problematikkerne: <i>kørsel mod endestop</i> og <i>decentreret byrde</i>. Samtidig blev løsninger dog præpareret for de øvrige algoritmer ved at inkludere de sensorer som var nødvendige for på et senere tidspunkt at udbygge funktionaliteten. Det var dermed vurderingen at resultatmålet blev delvist indfriet.
Arbejdspakke 3 / Udvikling af positionerings- og navigationssystem.	Sensorsystem til høst af data	Sensorsystemet skulle dels imødekomme navigationssystemet dels imødekomme udvikling af sway control. Der blev arbejdet med to koncepter, ét baseret på GPS og ét baseret på encodere og et lokalt kalibreringspunkt ved dockingstationen. Koncepterne blev udfoldet til et punkt hvor det var muligt at vælge det bedst egnet til videre udvikling. Udviklingen inkluderede analyse af konteksten og sikkerhedsaspekter i forhold til autonom navigering. Sensorsystemet blev udfoldet via et grundigt udviklings- og testarbejde og resultatet dokumenteret i TABEL 10. Det er således vurderingen at resultatmålet blev indfriet.
-	Optimering af data og effektivisering af systemets tilgængelighed	Optimering af data fandt sted ved udvikling og udvælgelse af de sensorer som gav den bedste data kvalitet.

		Projektet blev inspireret af overvejelser om sikkerhed i forhold til autonomi fra bilindustrien og elementer fra denne tilgang blev inkluderet i projektet. Der blev kortlagt 3 potentielle måder hvorpå systemet kunne effektivisere via øget tilgængelighed. Heraf blev 2 ud af 3 implementeret med gode resultater. Det er på den baggrund vurderingen at resultatmålet blev delvist indfriet.
Arbejdspakke 4 / Samkørsel af udviklingsspor	Test og verificering.	I den afsluttende arbejdsopgave 4 blev den udviklede funktionalitet fra alle tidligere arbejdsopgaver testet i samspil på en 1:1 opstilling. Oprindeligt var det intentionen at gennemføre tests på en konkret byggeplads, men det var vurderingen at der var mulighed for at teste grundigere og prøve flere ting af på et prøvebyggeri. Derfor blev der opført en stilladskonstruktion som kunne fungere som en tro kopi af en virkelig byggesag. På denne blev alle scenarier gennemspillet og systemets funktionalitet kunne testes. Konklusionen var, at alle funktioner fungerede efter hensigten og der var derfor vurderingen at målet med samkørslen af udviklingsspor var indfriet.
Generelt / Afledte effekter	Patentansøgning	I arbejdet med sensorsystemet var det nødvendigt at opdatere det mekaniske design. Dette førte til nogle nye ideer, som senere viste sig at være så interessante, at de resulterede i en patentansøgning, som blev indleveret efter projektets afslutning i efteråret 2022. Dette kan ses som en afledt effekt af projektet, men samtidig en effekt som næppe ville have fundet sted uden projektet. Såfremt patentet bliver udstedt, vil det give Conhoist en stærk position på markedet ikke mindst i forhold til eksport, hvor særligt Sverige, Norge, Tyskland, Holland, England og Canada er interessante markeder.
	Kortlægning af behov og fordele ved at løsninger bliver IoT-connected	Flere gange i projektet blev det konstateret at der ville være markante fordele ved at Conhoist systemet var online, altså IoT-connected. Dette gjaldt særligt i forhold til opsamling og analyse på brugsdata, samt mulighed for opdateringer og udrulninger af ny funktionalitet. Dette var et projekt i sig selv og derfor blev det ikke inkluderet i MUDP-projektet, men opmærksomheden på behovet var en forudsætning for i senere/andre sammenhænge at gennemføre denne udbygning af systemet.

Bilag 1. Analyse af anvendelsesgraden af gængse laster ved energirenovering

Analysen der præsenteres i det følgende, er baseret på interview og observationer uden anvendelse af statistiske metoder. Derfor skal de angivne procentsatser tages med et vist forbehold. Ligeledes bemærkes det at der fra byggesag til byggesag vil være stor forskel på anvendelsesgraden af de forskellige typer af laster.

1. FOUR QUARTER PALLETS WITH BRICKS



Four quarter pallets loaded with bricks placed on one EUR-pallet.

One quarter pallet = 180 kg
EUR-pallet = 25 kg
Pallet fork = 55 kg
Total = $180 \text{ kg} \times 4 + 25 \text{ kg} + 55 \text{ kg} = \mathbf{800 \text{ kg}}$

6 %

of the loads
on a typical
renovation

2. EUR-PALLET WITH 20 ROLLS OF ROOFING FELT



20 rolls of roofing felt loaded on one EUR-pallet.

One roll of roofing felt = 24,75 kg
EUR-pallet = 25 kg
Pallet fork = 55 kg
Total = $24,75 \text{ kg} \times 20 + 25 \text{ kg} + 55 \text{ kg} = \mathbf{575 \text{ kg}}$

10 %

of the loads
on a typical
renovation

3. EUR-PALLET WITH SIX WINDOWS



Six windows each weighing 100 kg placed on a EUR-pallet.

One window = 100 kg

EUR-pallet = 25 kg

Pallet fork = 55 kg

Total = $100 \text{ kg} \times 6 + 25 \text{ kg} + 55 \text{ kg} = \mathbf{680 \text{ kg}}$

5 %

of the loads
on a typical
renovation

4. EUR-PALLET WITH FOUR WINDOWS



Four windows each weighing 180 kg placed on a EUR-pallet.

One window = 180 kg

EUR-pallet = 25 kg

Pallet fork = 55 kg

Total = $180 \text{ kg} \times 4 + 25 \text{ kg} + 55 \text{ kg} = \mathbf{800 \text{ kg}}$

4 %

of the loads
on a typical
renovation

5. EUR-PALLET LOADED WITH CEMENT



42 bags of cement each weighing 25 kg loaded on a EUR-pallet.

One bag = 25 kg

EUR-pallet = 25 kg

Pallet fork = 55 kg

Total = $25 \text{ kg} \times 42 + 25 \text{ kg} + 55 \text{ kg} = \mathbf{1130 \text{ kg}}$

3 %

of the loads
on a typical
renovation

6. BRICK LINTELS



Brick lintels each weighing 100 kg.

One window = 100 kg
Total = 100 kg x 3 = **300 kg**

3 %

of the loads
on a typical
renovation

7. EUR-PALLET LOADED WITH ROOF TILES



EUR-pallet loaded with 252 roof tiles.

2,8 kg per roof tile
EUR-pallet = 25 kg
Total = 2,8 kg x 252 + 25 kg = **730,6 kg**

14 %

of the loads
on a typical
renovation

8. BIG BAG WITH MORTAR



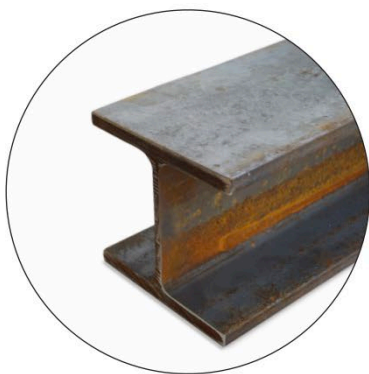
One Big Bag loaded with mortar.

Capacity = 0,5 m³
Density = 1500 kg/m³
Total = 0,5 m³ x 1500 kg/m³ = **750 kg**

3 %

of the loads
on a typical
renovation

9. IPE BEAM



IPE 200 beam - 5 meter long

Weight = 22,4 kg/m

Total = 22,4 kg/m x 5 m = **112 kg**

3 %

of the loads
on a typical
renovation

10. EUR-PALLET WITH REBAR STEEL



Rebar steel varies in size and shape.
The average weight for a EUR -pallet is
around **400 kg**.

4 %

of the loads
on a typical
renovation

11. STACK OF WOODEN PLATES



Stacks of wooden plates and other types of plates vary a lot in size and shape.
The average weight is **between 400 kg and 700 kg**.

7 %

of the loads
on a typical
renovation

12. RAFTER CONSTRUCTION



Rafter construction vary a lot in size and shape. The average weight is **between 150 kg and 600 kg.**

8 %

of the loads
on a typical
renovation

13. JUNK BAGS



Junk is the single most load to handle when renovating a building. A typical weight is **between 300 kg and 800 kg.**

25 %

of the loads
on a typical
renovation

Conhoist can handle the **majority, i.e. estimated above 95% of all loads** used in a general renovation. The only exception is the EUR-pallet with cement. However, this can easily be overcome by removing some bags or by ordering fewer bags per pallet from the supplier.

PALLET FORK

In order to lift EUR-pallets a pallet fork like this one is needed. This type can lift up to 1000 kg.



Autonom traverskran til fremme af bæredygtigt byggeri

Projektet har haft den overordnede målsætning at udvikle en traverskran til byggebranchen imod højere grad af autonomi og effektivisering således at løsningen kan blive et værktøj, der bidrager til højere rater af energirenoveringer med de gevinster der følger bl.a. i form af reduceret materiale- og ressourceforbrug (sammenlignet med nybyg) og lavere energiforbrug til opvarmning. Endvidere har projektet haft ambitionen om at tøjle og udvikle moderne og tidssvarende teknologier i et fysisk redskab til byggebranchen, der er kendetegnet ved at være langsommere til at adoptere de muligheder, der opstår qua teknologiske fremskridt sammenlignet med øvrig industri. Fundamentet i projektet har været et grundigt research arbejde, der har kortlagt generelle såvel som kontekstafhængige forhold, der har en betydning for hvordan det er muligt at anvende tidssvarende teknologi i et fysisk redskab, der skal kunne tåle den hårdhændede behandling af maskiner som er karakteristisk for branchen.



Miljøstyrelsen
Tolderlundsvej 5
5000 Odense C

www.mst.dk