



Slutrapport Fremtidens Grønne Byggeplads MUDP-projekt

MUDP Rapport

April 2025

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:

Naja Villadsen, Teknologisk Institut
Rasmus Faurskov Cordtz, Teknologisk Institut
Katharina Brarup Schäfer, Teknologisk Institut
Marcus Jørgensen, A/S
Per Aarsleff A/S

Fotos:

Ejendomsselskabet Olav De Linde
KM ConneX
Hans Christian Mathiasen, Imagic ApS
Anders Gammelgaard Jensen, Teknologisk Institut
Lisa Maria Rivera Kjær, Teknologisk Institut
Krak, 2022, 2023, 2024
Projektpartnere

ISBN: 978-87-7038-739-2

Miljøstyrelsen offentliggør rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter indenfor 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.

Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram

Projektet, som er beskrevet i denne rapport, er støttet af Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram (MUDP) under Miljøministeriet, der støtter udvikling, test og demonstration af miljøteknologi.

MUDP investerer i udvikling af fremtidens miljøteknologi til gavn for klima og miljø i Danmark og globalt, samtidig med at dansk vækst og beskæftigelse styrkes. Programmet understøtter dels den bredere miljødagsorden, herunder rent vand, ren luft og sikker kemi, men understøtter også regeringens målsætninger inden for klima, biodiversitet og cirkulær økonomi.

Det er MUDP's bestyrelse, som beslutter, hvilke projekter der skal modtage tilskud. Bestyrelsen betjenes af MUDP-sekretariatet i Miljøstyrelsen.

MUDP-sekretariatet i Miljøstyrelsen
Tolderlundsvej 5, 5000 Odense | Tlf. +45 72 54 40 00

Mail: ecoinnovation@mst.dk
[MUDP's hjemmeside](#)

Denne slutrapport er godkendt af MUDP, men det er alene rapportens forfatter/projektlederen, som er ansvarlige for indholdet. Rapporten må citeres med kildeangivelse.

Indhold

1.	Baggrund	6
2.	Engelsk summary	8
3.	Dansk resume	9
4.	Kortlægning	10
4.1	Opsøgning og organisering af partnerskab	10
4.2	Screeningkriterier for identificering af byggeplads	11
4.3	Beskrivelse af byggepladsen	11
4.4	Identificering og prioritering af tekniske tiltag	12
4.5	Visualiseringsplatform	13
5.	Forretningspotentialer og anbefalinger	15
5.1	Konsekvensanalyse	15
5.2	Forretningsanalyse- og potentialer	16
5.3	Anbefalinger til fremtidige byggepladser	16
6.	Metoder og instrumenter anvendt til at udføre demonstrationer	20
6.1	Design og opsætning af sensornetværk på byggepladsen	20
6.2	Dataopsamling fra byggestrøm, skurvogne og visualisering	22
6.3	PEMS-målinger på maskiner	25
6.4	Støjmålinger på maskiner	26
6.5	Digital twin-model	26
6.6	Telematikdata fra entreprenørmaskiner til digital twin model	29
7.	Implementering af sensornetværk og aktiv støvdæmpning	34
7.1	Sensornetværk installeret og driftet	34
7.2	Aktiv støvdæmpning	42
8.	Test af energioptimerende og emissionsreducerende tiltag på entreprenørmaskiner	46
8.1	Test af elektrisk-, hybrid- og dieseldrivelinje på Volvos testsite i Eskilstuna	46
8.2	Test af Stage IV Gravemaskine i grusgrav	49
8.3	Emissionsmålinger på pæleboremaskine på byggeplads	53
8.4	Indsættelse af elektrisk entreprenørmaskine, fastcharger og datasetup	57
9.	Demonstration af CO₂-reducerende energiforsyning	61
9.1	Reduktion af energiforbrug og energitab	61
9.2	Elektrificering og selvforsyning – solceller og batterier	63
9.3	Indeklima i skurvogne	67
9.4	Datadrevet værdiskabelse og energy management	69
10.	Demonstration af teknologi til smart adfærd og logistik	72
10.1	Udvikling og implementering af forecast algoritmer	72
10.2	Digital tvilling til at forudsige støjemissioner fra tungt udstyr på byggepladsen	79

Bilag 1. Forretningsanalyser	88
Bilag 1.1 Implementering og drift af et sensornetværk på byggeplads	88
Bilag 1.2 Støvbekæmpelse med DUST-AWAY, der består af CMA (Calcium Magnesium Acetate)	95
Bilag 1.3 Reduktion af energiforbrug og energitab ved brug af moderne skurmoduler	100
Bilag 1.4 Sammenligning af gravet rende ved ECO mode og Power mode	105

1. Baggrund

Bygge- og anlægssektoren står over for stadigt stigende krav fra både myndigheder og bygherre om grønne tiltag, der skal reducere byggepladsens negative påvirkning på omgivelserne. Da projektet Fremtidens Grønne Byggeplads blev initieret havde branchen i 2016 en udledning på ca. 3500 tons NOx og ca. 320 tons PM2.5, svarende til hhv. 10 % og 46 % af vejtrafikkens samlede emissioner. Fra CONCITO's klimaanalyse for byggeriet fremgår det at byggepladsens udledninger udgør ca. 9 pct. af en gennemsnitlig bygnings samlede klimapåvirkning i et 50-årige livscyklusperspektiv¹.

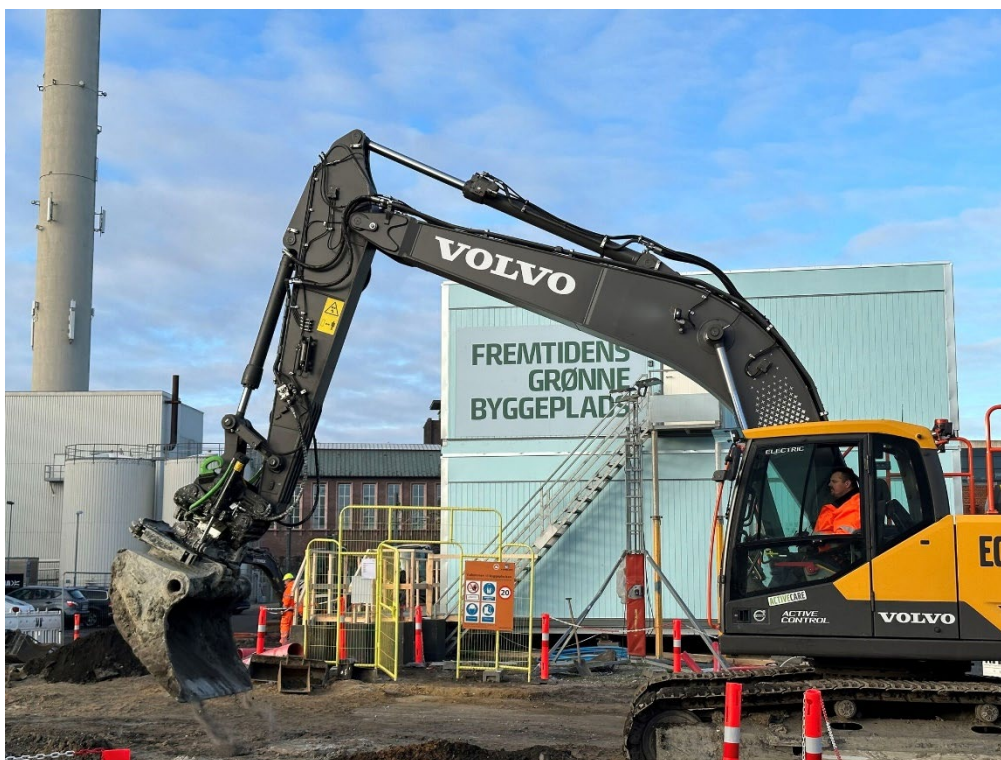
Potentialerne for at forbedre miljø- og klimapåvirkningerne i bygge- og anlægsbranchen er derfor store, hvorfor projektet Fremtidens Grønne Byggeplads blev iværksat. Fremtidens Grønne Byggeplads har haft som mål at etablere en datadrevet fuldskalademonstration af fremtidens byggepladser med lavemissionsteknologier, CO₂ reducerende energisystemer samt værktøjer til logistikoptimering og smart adfærd.

Effekten af moderne teknologiske løsninger og tiltag på byggepladsen, der forbedrer påvirkningen på miljø og klima, skulle kvantificeres løbende med fokus på reduktion af sundheds- og klimaskadelige NOx- og partikelemissioner, CO₂ og støj. Ud fra modeller med real-time data skulle der foretages evaluering af, hvilke tiltag, der giver størst klima- og miljøgevinst for penge, og som fremadrettet kan implementeres i bygge- og anlægssektoren.

Per Aarsleff A/S (herefter også nævnt som Aarsleff) står bag mange opgaver inden for bygge- og anlægssektoren. De har naturligt rettet blikket mod en omstilling af koncernen, der både skal forbedre deres egen miljø- og klimapåvirkning samt fremtidssikre forretningen. Deres målsætninger om at etablere mere effektive byggeprocesser og arbejdsgange på byggepladsen går hånd i hånd med målsætningen for Fremtidens Grønne Byggeplads.

Projektet har demonstreret at energiforbrug, CO₂-, støj-, NOx- og partikeludledning effektivt kan reduceres gennem en kombination af energieffektivisering, adfærdsændring, elektrificering, alternative brændstoffer og filtre på maskiner. Øget digitalisering er et helt centralt virkemiddel. Denne rapport præsenterer projektets resultater og herunder de efterviste effekter og potentielle forretningsmodeller.

¹ <https://concito.dk/udgivelser/byggeriets-klimaanalyse-katalog-over-vigtigste-fokusomraader-accelereret-groen>



Byggepladsen på Mindet 6 i Aarhus.

Elektrisk gravemaskine foran skurvogsbyen på Mindet 6, som er demonstrationsbyggeplads i projektet Fremtidens Grønne Byggeplads.

2. Engelsk summary

This report presents a range of results and insights obtained through the flagship project, Future Green Construction Site, which focused on identifying and evaluating innovative technologies and initiatives that can reduce the environmental and climate impact of construction sites.

The project has demonstrated how measuring energy consumption and emissions of CO₂, NO_x and particles can contribute to qualified reduction through a combination of electrification, use of biofuels, digitalization and changed behavioral patterns.

Digitalization has been identified as a key factor in optimizing construction site operations. The use of sensor networks for real-time monitoring of emissions and noise levels has provided valuable data that can support more effective decision-making. The development of a digital twin platform can further support optimized logistical processes and resource utilization.

One of the key insights is the potential of electrifying construction machinery. Test results indicate that electrification can reduce energy consumption by more than 40% compared to traditional diesel-powered machines, while CO₂ is reduced by more than 80 % when using electricity from the Danish grid. Furthermore, analyses suggest that the use of biofuels such as HVO bio-diesel can lead to CO₂ reductions of up to 87%.

Energy-efficient site cabins have been highlighted as a way to reduce energy consumption on construction sites. The installation of solar panels and heat pumps can significantly reduce energy consumption, while also improving the indoor climate, which can contribute to a better working environment for employees.

The business analysis in the project highlights the economic potential of implementing these technologies. They show that investments in these kinds of initiatives can lead to significant long-term savings and strengthen competitiveness in the construction industry. The report recommends a strategic approach to integrating these technologies to achieve both environmental and economic benefits.

Overall, the report concludes that the Future Green Construction Site has provided value-creating insights into how the construction industry can achieve significant environmental and climate benefits by integrating innovative technologies initiatives into future construction processes.

3. Dansk resume

Denne rapport præsenterer en række resultater og indsigter opnået gennem fyrtårnsprojektet, Fremtidens Grønne Byggeplads, der har fokuseret på at identificere og evaluere innovative teknologier og tiltag, der kan reducere byggepladsers miljø- og klimaaftryk. Projektet har vist, hvordan måling af energiforbrug samt udledninger af CO₂, NOx og partikler kan bidrage til kvalificeret reduktion gennem en kombination af elektrificering, brug af biobrændstoffer, digitalisering og ændrede adfærdsmønstre.

Digitalisering er identificeret som en nøgelfaktor for optimering af byggepladsdriften. Anvendelsen af sensornetværk til overvågning af emissioner og støjniveauer i realtid har givet værdifulde data, der kan understøtte mere effektive beslutninger. Udviklingen af en digital twin platform kan yderligere bidrage til optimerede logistiske processer og ressourceudnyttelse.

En af de væsentlige indsigter er potentialet ved elektrificering af entreprenørmaskiner. Testresultaterne viser, at elektrificering kan reducere CO₂-emissionerne med over 40 % sammenlignet med traditionelle dieseldrevne maskiner, imens CO₂ reduceres med mere end 80 %, når der anvendes el fra det danske elnet. Desuden peger analyserne på, at anvendelsen af biobrændstoffer, som HVO-biodiesel, kan medføre en CO₂-reduktion på op til 87 %.

Energieffektive skurvogne er blevet fremhævet som en måde at reducere energiforbruget på byggepladser. Installation af solpaneler og varmepumper kan betydeligt reducere energiforbruget, samtidig med, at de kan forbedre indeklimaet, hvilket kan bidrage til et bedre arbejdsmiljø for medarbejderne.

Forretningsanalyserne i projektet understreger de økonomiske potentialer ved at implementere disse teknologier. De viser, at investeringer i sådanne tiltag kan føre til betydelige besparelser på lang sigt og styrke konkurrenceevnen i byggebranchen. Rapporten anbefaler en strategisk tilgang til at integrere disse teknologier, så der opnås både miljømæssige og økonomiske gevinster.

Samlet set konkluderer rapporten, at Fremtidens Grønne Byggeplads har tilvejebragt værdiskabende indsigter i, hvordan byggebranchen kan opnå betydelige miljø- og klimagevinster ved at integrere innovative teknologier tiltag i fremtidige byggeprocesser.

4. Kortlægning

4.1 Opsøgning og organisering af partnerskab

For at reducere bygge- og anlægsbranchen miljø- og klimaaftryk kræves mere viden. Særligt om hvilke teknologier, der i branchen kan give mest klima- og miljøgevinst for pengene. Ved projektets start eksisterede der et vidensgab mellem disse to. Derfor gik Teknologisk Institut forud for projektet i gang med at sammensætte et partnerskab, der i samspil kunne bidrage til at lukke dette gab. For at være succesfulde var det afgørende at sammensætte et partnerskab, der repræsenterede store dele af værdikæden og ikke mindst indeholdte ekspertise på vigtige teknologiske områder.

Aarsleff udgør den entreprenørielle rolle i projektet. Med koncernens mange opgaver indenfor bygge- og anlægssektoren har de sat mål om at reducere deres indvirkning på miljøet og klimaet. Øget fokus og skærpede krav fra både myndigheder, bygherrer og samarbejdspartnere samt tiltag, der forbedrer miljø- og klimapåvirkninger i byggeprocessen, stiller Aarsleff i en position, hvor de både har et samfundsmæssigt ansvar og et konkurrencemæssigt incitament for at reducere deres aftryk. Blandt andet ved at rette fokus mod omstilling af processer, produktion og arbejdsmetoder kan de optimere og fremtidssikre deres forretning. Med Aarsleff som partner er der potentielt i projektet en direkte aftager af de løsninger og resultater, der generes i projektet, og ikke mindst en værdifuld indsigt i eksisterende byggeprocesser.

Teknologisk Institut bidrager med projektledelse og styring af projektet. Derudover stiller Teknologisk Institut eksperter og udstyr til rådighed indenfor datahåndtering, monitorering, støv, emissioner, brændstoffer, el og hybridmaskiner, telematik og optimalt sammenspil med el-infrastruktur ved implementering af solceller, batterier og tunge elektriske entreprenørmaskiner.

Udover Teknologisk Institut og Aarsleff består partnerskabet af en række værdifulde underleverandører.

DevLabs har understøttet monitorering af effekterne fra de tiltag, der er blevet demonstreret på byggepladsen. De har leveret state-of-the-art monitorerings- og visualiseringsudstyr, som er blevet installeret på byggepladsen forud for nedbrydningsfasen og efterfølgende har overvåget området helt frem til kort tid før projektafslutning.

Alumichem har understøttet forsøg med støvbinder på byggepladsen. De udvikler og producerer aluminater, polyaluminiumklorider og calciummagnesiumacetat af høj kvalitet. Deres produktportefølje dækker anvendelser indenfor vandrensning, betonindustrien, vintervedligehold og luftforurening.

Volvo Entreprenørmaskiner har sikret projektet adgang til state-of-the-art entreprenørmaskiner, herunder tunge hybride- og fuldt elektriske. De er en førende international producent, som med over 14.000 medarbejdere er de en af de største virksomheder i branchen.

Zeppelin Rental Danmark har udviklet og leveret skurvognsmoduler med øget digitalisering, laver energiforbrug og egenproduktion af el gennem solcellemodul til byggepladsen. De udlejer entreprenørmateriel såsom gravemaskiner, læssemaskiner, dumpere, dozere, kontor- og mandskabsmoduler, containere, lifte og pavilloner.

Til sidst styrkes partnerskabet ligeledes af to videninstitutioner. Institut for Byggeri og Bygningsdesign, Aarhus Universitet og Institut for Byggeri og Mekanisk Teknologi, Danmarks Tekniske

Universitet har bidraget til projektet gennem deres udvikling af en digital twin platform. Med udgangspunkt i BIM og byggepladsdata, kan platformen give et bedre overblik over udvalgte parametre og på sigt bruges til reeltidsanbefalinger til bl.a. logistik på byggepladser. Nationalt Center for Miljø og Energi, Aarhus Universitet, har udarbejdet konsekvensanalyse for udvalgte tiltag på byggepladsen.

4.2 Screeningkriterier for identificering af byggeplads

I projektets indledning skulle en demonstrationsbyggeplads identificeres. Fokus var på at finde en byggeplads, hvor demonstration og herunder tekniske tiltag kunne gennemføres i forbindelse med udførelse af et konkret byggeprojekt. For at identificere den bedst egnede byggeplads indførte projektet en række screeningskriterier, som blev brugt ifm. en screening af Aarsleffs projektportefølje:

- Byggepladsens levetid ift. til projektets varighed.
- Byggepladsen og byggeriets omfang.
- Byggepladsens geografiske placering.
- Konkrete aktiviteter på byggepladsen, herunder omfanget af brug af maskiner og andre energiforbrugende enheder.
- Byggepladsens egnethed til opstilling af sensornetværk, herunder påvirkning gennem baggrundsemissioner og -støj fra nærmiljøet.
- Mulighed for nem overførelse af resultater til lignende byggepladser - hvor repræsentativ er byggepladsen i forhold til alle andre byggepladser i Aarsleff og branchen generelt?
- Bygherres accept af, at byggepladsen anvendes som demonstrationsbyggeplads.
- Adgang til digitale planer, BIM m.v.

Ud fra ovenstående kriterier blev højhusbyggeriet på Mindet 6 i centrum af Aarhus udvalgt som demonstrationsbyggeplads. Byggepladsen er placeret nær Aarhus Havn og bygherren på projektet er Ejendomsselskabet Olav De Linde.

4.3 Beskrivelse af byggepladsen

Byggepladsen på Mindet var ved projektets opstart endnu ikke "vundet" af Aarsleff, hvorfor der fra start opstod forsinkelser på projektet Fremtidens Grønne Byggeplads. Dette og andre forhold medførte at projektets afslutning blev udskudt et halvt år. Herunder en oversigt over de byggefaser som projektet Fremtidens Grønne Byggeplads har haft adgang til i projektperioden fra 1/1 2021 – 30/6 2024:

- Nedrivning (anden entreprenør).
- Etablering af byggeplads og skurvognsby, inkl. byggestrøm.
- Etablering af sekantpælevæg omkring byggegrube.
- Udgravning af byggegrube til kote -7,5 meter.
- Etablering af ankre i sekantpælevæggen.
- Etablering af 50 dybe borede fundamenter $\varnothing 1800$ mm til dybde af ca. 70 meter under terræn.

En visualisering af det færdige kontortårn ses herunder. Bygninger ved siden af tårnet og passage over vejen er renoverede eksisterende bygninger og konstruktioner.



Danmarks højeste kontorbygning kommer til at stå færdig i 2027.

Kilde: Ejendomsselskabet Olav De Linde

4.4 Identificering og prioritering af tekniske tiltag

Projektet Fremtidens Grønne Byggeplads vil demonstrere og evaluere effekten af tiltag til reduktion af sundhedsskadelige emissioner, støv og støj fra maskiner, byggeri og intern transport, samt CO₂ aftrykket fra strøm- og brændstofforbrug i byggeriets faser. Tidligt i projektet blev der udarbejdet en plan for, hvilke konkrete tiltag, der ville blive testet og dokumenteret. Disse blev løbende justeret, f.eks. grundet uforudsigelige forudsætninger, som forhindrede gennemførelse, som beskrevet i projektansøgningen og nødvendiggjorde mitigerende tiltag blev således igangsat.

De gennemførte tekniske tiltag fremgår herunder i hovedpunkter:

Sensornetværk, dokumentation og visualisering

Et netværk af sensorer er blevet installeret og driftet på byggepladsen for at overvåge emissioner, luftkvalitet og støj. Referencemålinger er blevet gennemført med en mobil målestation. Der er løbende logget data fra de mange sensorer. Disse data er brugt til understøttelse af forskellige analyser, og til dokumentation af effekt fra tiltag på byggepladsen. Målet har desuden været at indsamle viden om opsætning og drift af sensornetværk på byggepladser.

Emissions- og støjreduktion

Emissions- og støjreducerende tiltag er blevet demonstreret, dokumenteret og analyseret på forskellige vis. Der er gennemført test af forskellige entreprenørmaskiner med PEMS-måleudstyr, som præcist måler emissioner fra udstødning under dynamisk drift. Effekter af adfærd, drivlinjekonfigurationer, hybridfunktioner, økofunktioner, biobrændstoffer mm. er blevet analyseret. Der er desuden gennemført støvbekæmpelseskampagner på byggepladsen, hvor effekten af en ny støvbinder er blevet dokumenteret.

CO₂-reducerende energisystemer

Til at demonstrere CO₂ reducerende energisystemer, er der blevet etableret en energieffektiv og monitoreret skurvognsby på byggepladsen. AI byggestrøm er blevet udstyret med digital overvågning, og en 23 tons fuld elektrisk gravemaskine er blevet grundigt afprøvet. Derudover er biobrændstof (HVO) anvendt på alle entreprenørmaskiner. Den etablerede skurvognsby har høj energieffektivitet, bedre isolering, varmepumper, solceller og sensorer, der understøtter lavt energiforbrug samt monitorering og styring af indeklima. Digitalisering af skurvognsby gør det muligt at kontrollere, at skurvogne ikke efterlades med åbne vinduer, ligesom ventilation automatisk styres efter indeklima. Den digitale overvågning af byggestrømmen sker på byggepladsens hovedtavler og alle andre større tavler. Overblikket over byggestrømmen er brugt til dokumentation af belastning, ligesom den fremadrettet vil kunne bruges aktivt til at komme potentielle nedbrud i forkøbet samt til prognoser.

Volvo Entreprenørmaskiner har bidraget med en elektrisk gravemaskine, som er blevet testet på byggepladsen over nogle uger. Til det formål blev der oprettet midlertidig ladeinfrastruktur med lynlader tilkoblet Teknologisk Instituts EnergyFlexLab for overvågning af ladningsforløb. Det blev dokumenteret, hvor effektivt gravemaskinen kunne gennemføre en række forskellige graveopgaver, hvordan opladninger kunne tilpasses pauser, og hvordan operatørerne oplevede den elektriske maskine mm. Der er desuden blevet stillet flere både hybride og elektriske tunge entreprenørmaskiner til rådighed for omfattende test på Volvos eget testsite i Sverige.

Smart adfærd og effektiv byggepladslogistik- og layout

Der er udviklet en digital byggepladsmodel (Digital Building Twin), som effektivt analyserer og visualiserer dynamiske data fra entreprenørmaskiner og andre datakilder. Formålet er at kunne implementere forbedringstiltag hurtigt og effektivt. Som inddata til modellen er der arbejdet med telematikdata fra entreprenørmaskiner, PEMS-data, bevægelsessensorer og billeder fra tårnkamera.

4.5 Visualiseringsplatform

I projektperioden var der en visualiseringsplatform på byggepladsen. Den bestod af en træstruktur omkring skurbyen med en terrasse øverst. Hensigten var at skabe et offentligt tilgængeligt sted, hvor projektpartnere, bygherre og udefrakommende kunne få indblik i projektet, og et udkig til byggeriet. På platformen fremgik info om projektet i form af plancher, der med QR-koder kan lede den besøgende til mere information. Faciliteten var desuden anvendt ifm. besøg fra bl.a. presse, naboer og MUDPs bestyrelse.



Visualiseringsplatform på Mindet 6. Store plancher med informationer om Fremtidens Grønne Byggeplads-projektet er monteret på skurvognsbyen som en del af en større visualiseringsplatform.

5. Forretningspotentialer og anbefalinger

Med ambitiøse og strategiske målsætninger om at få viden om, hvordan byggepladsens negative aftryk på omgivelserne kan reduceres, kan AARSLEFF og andre aktører i byggebranchen drage fordel af den dokumenterede viden, der er indsamlet på tværs af indsatser inden for emission-, støj- og støvreduktioner, indeklima og smart energistyring. Ved at trække på projektets erfaringer kan der træffes investeringsbeslutninger på bedre vidensgrundlag og entreprenører kan stå stærkere i tilbudsgivningen, samt udføre bygge- og anlægsprojekter med et lavere aftryk på omgivelserne.

I projektet er der foretaget en konsekvensanalyse på baggrund af de gennemførte forsøgselementer og øvrige tiltag. Dertil er der udarbejdet forretningsanalyser for udvalgte tiltag. Til sidst er der listet en række anbefalinger til branchen.

5.1 Konsekvensanalyse

I projektet beregnes emissionskonsekvenserne af at indføre emissionsreducerende tiltag for maskinerne på byggepladsen. Der regnes på et basisscenarie, hvor offroad diesel bruges, og fem forskellige emissionstiltag:

- HVO biodiesel,
- mild elektrisk hybridisering af en pæleboremaskine,
- 10 % tomgangstid for gravemaskiner
- samt elektrificering af alle gravemaskiner og alle maskiner på pladsen.

For alle scenarier opnås de største reduktioner i energiforbruget og NO_x- og PM-emissionerne ved at elektrificere alle maskinerne på byggepladsen. De beregnede besparelser i energiforbruget, NO_x- og PM-emissionerne er på hhv. 38 %, 85 % og 66 %, set i forhold til basisscenariet. I takt med at sol- og vindenergi stiger i det danske energisystem forventes yderligere NO_x - og PM-emissionsbesparelser. Ved fuld elektrificering sker alle udledninger på kraftværkerne, hvorfor gevinsten for den lokale luftkvalitet maksimeres (nulemission af NO_x og PM). For CO₂ opnås emissionsbesparelser på 87 % i HVO-, hybrid- og tomgang-scenarierne, hvor alle maskinerne bruger HVO.

For gravemaskiner alene opnås en energibesparelse på 38 %. CO₂ - og NO_x-emissionsreduktioner på hhv. 75 % og 6 % ved elektrificering set i forhold til basisscenariet. Den lille NO_x-reduktion skyldes det noget lavere energiforbrug, da NO_x-emissionsfaktoren for elforbruget samlet set er højere end ved brug af offroad diesel (og HVO). PM-emissionerne bliver mere end 11 gange højere ved elektrificering, grundet de lokale kraftværkers høje PM-emissioner i Aarhus. NO_x-og PM-emissionerne fra kraftværkerne forventes at falde i fremtiden, i takt med at andelen af sol- og vindenergi stiger i det danske energisystem. De lokale emissioner er dog nul. For gravemaskiner opnås de største emissionsreduktioner i tomgangs-scenariet. Her falder de

beregnete NO_x-, PM- og CO₂-emissioner med hhv. 8 %, 1 % og 87 % i forhold til basis, og energiforbruget falder med 4 %.

For pæleboremaskinen opnås ved elektrificering en energibesparelse på 38 %, og NO_x- og CO₂-emissionsfald på hhv. 32 % og 75 %. NO_x-reduktionen i procent bliver mindre end reduktionen i energiforbruget, og PM-emissionerne bliver mere end 9 gange højere end i basisscenarioet, af samme årsag som nævnt for gravemaskiner. De lokale emissioner er dog nul. I mild hybrid-scenariet (hvor pæleboremaskinen bruger HVO) beregnes et uændret energiforbrug for pæleboremaskinen, mens NO_x- og CO₂-emissionerne falder med hhv. 18 % og 87 % og PM-emissionen stiger med knap 3 %, set i forhold til basisscenarioet.

5.2 Forretningsanalyse- og potentialer

Der er i projektet gennemført forretningsanalyser for fire udvalgte tiltag. Analyserne, som fremgår af Bilag 1. Her fokuseres på tiltagenes business case samt indvirkning på ESG-faktorerne. De fire forretningsanalyser er som følgende:

1. Sensornetværk: Implementering og drift af sensornetværk på byggeplads
2. Støvbekæmpelse: Støvbekæmpelse med DUST-AWAY
3. Energiforbrug: Energibesparelse ved valg af skurvogn med egenproduktion af strøm
4. Entreprenørmaskiner: Grave rende som brændstofreducerende tiltag

5.3 Anbefalinger til fremtidige byggepladser

Sensornetværk

1. Ved opsætning af sensornetværk er det vigtigt at starte med at definere formålet med sensorerne og inddrage medarbejderne på pladsen.
2. Ved opsætning af sensornetværk kan der med fordel sondres imellem almindelige sensorer forsynet med el via elledning og selvforsynende sensorer forsynet fra solceller og batteri. Dette fordi mange byggepladser er meget dynamiske og vil kræve jævnlig omrokering af sensorer for at gøre plads til byggeprocesser. Selvforsynende enheder bør indeholde GPS således at måledata altid kan knyttes til en sensorposition.
3. For at kunne separere emissioner fra byggepladsen fra baggrundsemissioner anbefales det at have en baggrundssensor.
4. Vejr og vind påvirker både sensorerne og byggeprocessen. Derfor kan der med fordel indtænkes en vejrstation.
5. Det optimale antal sensorer afhænger af formålet med netværket. I et udendørs miljø bliver partiklerne hurtigt spredt. Hvis der er interesse i en bestemt kilde, kan der med fordel opsættes sensorer så tæt på denne kilde som muligt. Som minimum placeres en i hvert verdenshjørne.
6. Det kan anbefales at måle på flere størrelsesfraktioner af partikler heriblandt PM₁₀ og måske endnu større.

Støvbekæmpelse

7. Det er vigtigt med en god støvbekæmpelse på pladsen af hensyn til medarbejdernes helbred og eventuelle gener for naboer.
8. For at opnå målbar evidens for støvdæmningsmidler kan det anbefales at opsætte en længere prøveperiode og supplere med målinger af partikler større end PM_{2.5}.

Entreprenørmaskiners energiforbrug og emissioner

9. Fortsat fokus på reduceret tomgangtid som til trods for historiske indsatser fortsat ofte ligger over 25 %. Moderne Stage IV og V maskiner, der er udstyret med røggas-efterbehandlingsudstyr, fungerer særdeles effektivt når maskinerne belastes under reel drift. NOx kan derimod ikke renses ud af røggassen ved tomgangsdrift. Det betyder, at lokale koncentrationer ved tomgang er langt højere end under reel drift.
10. Maskiner med mange lavlast operationer såsom pæleboremaskiner kan med fordel - om muligt - bestilles som mild hybrid, hvor lavlast operationer håndteres med en elmotor via strøm fra et mindre batteri, og hvor diesel-hovedmotoren er slukket. Dette fordi målinger viser, at lavlast operationerne (som under målinger i projektet kun dækkede ca. 25 % af tiden) udgør en stor del af de samlede emissioner. En mild hybridisering bør ses som et omkostningseffektivt trin mod fuld elektrificering, som også kan give CO₂ gevinster.
11. Differentieret brug af maskinernes ECO mode. Ved visse operationer er det eftervist, at man samtidigt kan øge produktivitet og sænke energiforbrug og emissioner. Et eksempel er rendegravning hvor forsøg viste, at operatøren mere effektivt kunne styre gravemaskinens operation ved lavere motorbelastning og hydrauliktryk (ECO mode). Resultatet var udover energibesparelser en produktivitetsøgning på ca. 15 %.

Biobrændstoffer, herunder HVO

12. De fleste motorer er godkendt til brug af HVO, et drop-in brændstof, der overholder dieselstandard (EN 590). Det er imidlertid vigtigt at sikre, at maskinens leverandør accepterer brugen af biobrændstof, da det kan påvirke garantiforholdene.
13. Forhold omkring brændstofleverance og logistik kan være mere tidskrævende end ved konventionel diesel, hvor der altid er en tankbil i nærheden.
14. CO₂-reduktion afhænger nærmest udelukkende af den certificerede effektivitet idet energieffektiviteten, når anvendt i forbrændingsmotor, er nærmest identisk med den for konventionel diesel. Ved partikelemissioner og NOx, er der ikke entydige reduktioner med HVO sammenlignet med diesel.

Ren eldrift af tunge entreprenørmaskiner

15. Planlægning for tilstrækkelig strømkapacitet bør igangsættes tidligt, så den forventede elektrificering af arbejdet dækkes ind af byggestrømmen. Det er i den sammenhæng vigtigt at få afklaret hvem der står for hvad. Hvad angår rollefordelingen så kunne det være en opgave for bygherre, at sikre rettidig adgang til tilstrækkeligt strøm ligesom det kunne være en opgave for energiselskaber at levere ladere og energilagere.
16. For at optimere brugen af elektriske maskiner i bygge- og anlægsbranchen bør der tages højde for maskinens batterikapacitet, ladeeffekt og tilgængeligt ladeudstyr. Natladning ved lav effekt og lynladning om dagen bør tilpasses den konkrete opgave. Hvis lynladning er nødvendig, skal det sikres, at der er tilstrækkelig effekt til at lade flere maskiner samtidigt. Alternativt bør der planlægges med forskudte pauser for operatørerne eller et indskudt energilagere, for at undgå afbrydelser i arbejdet. Ved at overveje disse elementer kan der opnås effektiv og kontinuerlig drift.
17. Operatøruddannelse og instruktioner ift. den konkrete byggeplads bør gå forud for brugen af eldrevne maskiner, for at sikre gode laderutiner og understøtter sikkerhedsforholdene.
18. Data for byggestrømbelastning bør indsamles således prognoser for byggestrøm på fremtidige byggepladser, kan understøttes.

19. Placering af ladeanlæg skal indtænkes i indretning og logistik på byggepladsen så man sikrer let og sikker adgang til ladning der ikke spærrer for anden aktivitet. Byggepladsen kan med fordel indrettes således at maskinen kan holde ét sted flere gange dagligt i forbindelse med opladning. Det kræver blandt andet tilvænning og planlægning. I praksis kan det være en udfordring med en fast placering af ladestandere, der sikrer adgang til maskinen mindst 2-3 gange om dagen og natten over.
20. En elektrisk version af en entreprenørmaskine koster i 2024 to-tre gange så meget som en konventionel. Desuden må det forventes, at en markant andel af driftsomkostningerne vil gå til ladeinfrastruktur. Herunder øget udgift til el tilslutning, lynladere og relevante batterilagere, der kan udjævne belastning på byggestrøm og elnet.
21. For at sikre en effektiv elektrificering af maskinparken på en byggeplads er det afgørende at fokusere på strømforsyning, ladeinfrastruktur, maskinlogistik og planlægning. Under en testkampagne med en 23-ton elektrisk gravemaskine kunne byggestrømmen håndtere belastningen. Men hvis der havde været 2-3 maskiner med for eksempel 300 kW lynladning, ville en lade-styring eller indskudt energilager have været nødvendig for at undgå nedbrud i byggestrømmen. Dette ville betyde, at operatørerne ikke kunne holde pauser samtidigt, hvilket ellers er ønsket.

Byggestrøm

22. Permanent overvågning af byggestrøm bør etableres på byggetavler ved hjælp af standardenheder for at optimere driften. Dette kan opnås ved at implementere realtids-overvågning, der vises på et display ved byggetavlen og som desuden kan konfigureres til at kommunikere realtidsdata til en database. Dette vil fremme uddannelse og imødekomme fremtidige behov for prognoser.
23. Overvågning af byggestrøm kan med fordel anvendes til at sikre stabil og driftssikker byggestrøm i en tid, hvor øget elektrificering stiller stadigt større krav. Udfordringer med skæv fasefordeling, overbelastning, blackout og lignende kan håndteres, inden et potentielt blackout leder til reduceret produktivitet for flere berørte medarbejdere.
24. Bedre overvågning og den afledte mulighed for prognoser, kan understøtte implementering af tunge elektriske entreprenørmaskiner. Prognoser er vigtige for omkostningseffektivt at dimensionere den elektriske tilslutning og eventuelle behov for energilager.

Skurvognsmoduler

25. Højisolerede skurvogne med varmepumpe-opvarmning leder til et markant lavere energiforbrug. Fokus bør derfor rettes mod Total Cost of Ownership (TCO) over byggeprojektets levetid som motivator for indkøb/leje af mere energieffektive skurvogne.
26. Solceller monteret ovenpå skurvogne og andre steder, hvor der måtte være plads, kan dække en væsentlig del af skurvognenes energiforbrug.
27. Ved etablering af solcelleanlæg kan egetforbruget af solcellestrøm ofte øges ved hjælp af et batterisystem som energilager. Rentabiliteten af dette afhænger af indretningen af den aktuelle byggeplads og energiforbrugsmønstret. Det er mindre væsentligt, om lagringskapaciteten leveres via energilager ved skurvognsbyen eller energilager tilknyttet lynladere til elektriske entreprenørmaskiner, så længe styringen understøtter en funktionalitet, der reducerer mængden af solcellestrøm, der sendes retur til elnettet.

28. Luftkvaliteten i særligt skurvogne, som anvendes til kontor, bør overvåges. Desuden bør den nødvendige ventilationskapacitet og ventilationsstyring sikres for at tilvejebringe et godt arbejdsmiljø og god koncentration.
29. Det digitale setup bør udformes proaktivt for at sikre et godt arbejdsmiljø og fremme adfærd, der både forbedrer arbejdsmiljøet og reducerer energiforbruget. Dette kan blandt andet inkludere installation af CO₂-sensorer og simple berøringssensorer, der sender notifikationer til byggepladslederen eller andre relevante medarbejdere, hvis der er behov for handling.

Digitalisering

30. Der bør sættes øget fokus på digitalisering og adgangen til kompetencer, der kan understøtte en effektiv håndtering af de nødvendige digitaliseringstiltag. Agil og omkostningseffektiv digitalisering må forventes at blive nøglen i en fremtid, hvor langt de fleste arbejdsprocesser vil blive understøttet af data.
31. Der er aktuelt behov for flere data til at håndtere ny lovgivning, samtidig med at lavthængende frugter kan høstes gennem digitalisering. Dette gælder områder som miljø- og støjovervågning på byggepladser, øget energieffektivisering og forbedret arbejdsmiljø i skurvogne samt sikring af en mere stabil og fremtidssikker byggestrøm.
32. På længere sigt vil øget digitalisering understøtte modelbaseret optimering af blandt andet sikkerhed, logistik og arbejdsmiljø. Digital twin modeller vil kunne understøtte rettidig planlægning supporteret af prognoser. Her bør entreprenørbranchen efterspørge adgang til realtids telematikdata med høj frekvens fra deres maskinleverandører, da det vil øge den mulige modelbaserede værdiskabelse.

6. Metoder og instrumenter anvendt til at udføre demonstrationer

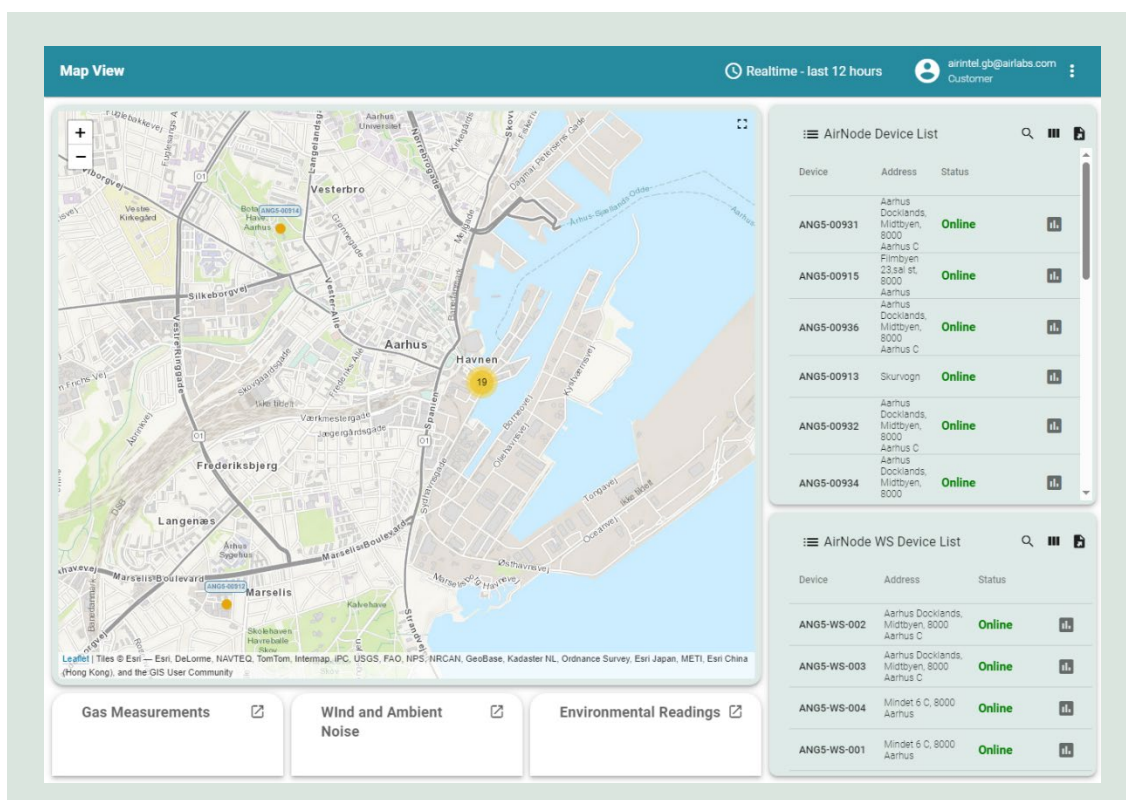
Til at demonstrere tiltag på byggepladsen er specifikke metoder og instrumenter anvendt til at indsamle og analysere data. Hovedfokus har været at anvende avancerede og højteknologiske metoder til at sikre præcis og pålidelige data under de dynamiske forhold, som naturligt er forholdene på en byggeplads.

6.1 Design og opsætning af sensornetværk på byggepladsen

I projektet er et sensornetværk anvendt til at overvåge relevante typer af luftforurening med særlig fokus på partikelemissioner og støj fra byggepladsen. AirNodes sensorer fra DevLabs blev anvendt til netværket. Sensornetværket bestod af 18 sensorer, der målte partikler og emissioner, samt fire sensorer, der har målt på støj og vind. Sensorerne blev strategisk placeret efter forventede emissioner og vejrforhold.

Inden opsætning blev alle sensorer kalibreret op mod National Center for Miljø og Energis (DCE) nationale målestation i København, og tilmed sammenlignet med referenceudstyr i en laboratorietest ved Teknologisk Institut. Hver sensor fungerer uafhængigt af de andre sensorer, og er dermed et modul for sig. Det modulære design betyder, at sensornetværket vil kunne tilpasses til både store og små byggepladser.

Sensorerne kobles til strøm for at logge og sende data. Data gemmes online via 4G eller LTE. Herefter visualiseres data via DevLabs online platform, som ses på FIGUR 1, og data trækkes ud via et API. Aarsleff arbejdede med API-adgangen i forhold til at integrere data i deres egen real-time visualiseringsplatform. Teknologisk Institut anvendte API-adgangen for periodevist at downloade data med henblik på at analysere effekten af tiltag implementeret på byggepladsen. Herudover har Teknologisk Institut løbende anvendt DevLabs online platform og API'et til løbende overvågning og kvalitetssikring af data og sensorer. En opgave, der i slutningen af projektet, blev overdraget til Aarsleff, for at give dem erfaringer med at drive denne type netværk.



FIGUR 1. Eksempel på DevLabs online platform, hvor data løbende er blevet opdateret, og kan visualiseres på forskellige måder.

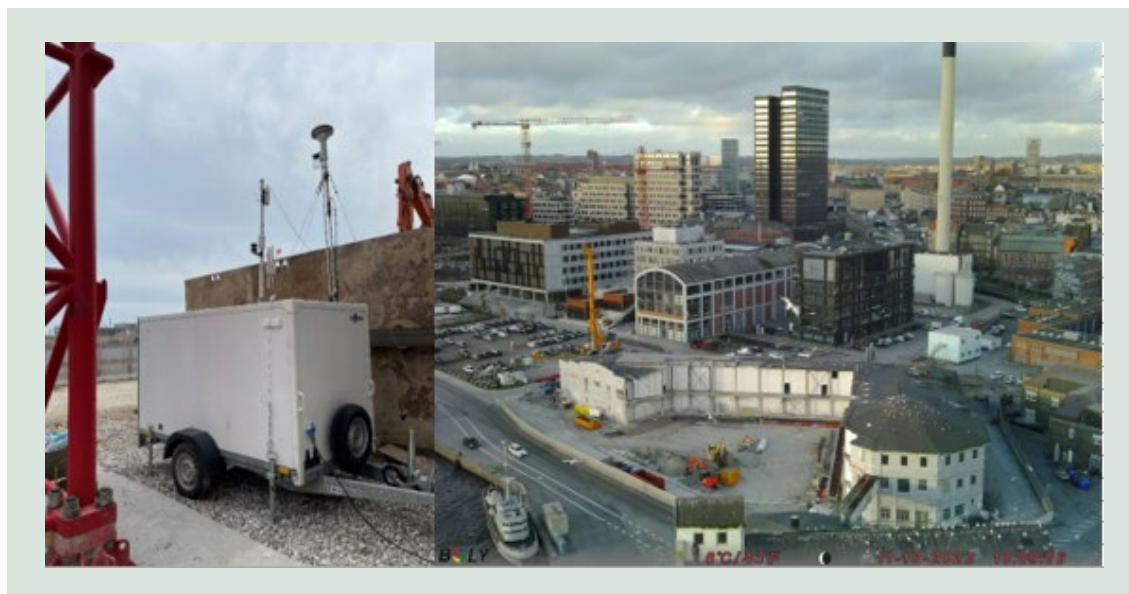
For løbende at validere data fra sensornetværket efter opsætning på byggepladsen sammenlignes målingerne med et bredt udvalg af relevant referenceudstyr, primært indenfor måling af partikler, som vist i TABEL 1. De instrumenter, som er benyttet i projektet, anvender tre forskellige måleprincipper:

- **Light scattering:** Detekterer og analyserer den måde, hvorpå lys spredes, når det rammer luftbårne partikler, hvilket giver information om partiklernes størrelse og koncentration
- **Charge diffusion:** Måleprincip baseret på, at partiklerne opsamler en elektrisk ladning, hvor mængden af opsamlede elektroner er proportional med koncentrationen og størrelse af partiklerne i luften.
- **Gravimetrisk:** Partiklerne opsamles over et filter, som periodisk og manuelt vægtes. Viden over luftflow'et, som suges ind i måleren og gennem filtret, gør det muligt at omdanne partikelvægt til koncentrationen.

TABEL 1. Overblik over anvendte partikelinstrumenter.

Parameter	Instrument	Måleprincip	Størrelsesområde	Koncentrationsområde
PM	AirNode	Light scattering	0,3 – 2,5 µm	- 1000 µg/m ³
PM	TSI DustTrak DRX 8533	Light scattering	0,1-15 µm	0,001–150 mg/m ³
PM	TSI OPS 3300	Light scattering	0,3-10 µm	0,001–35 µg/m ³
PN	TestoDiSCmini	Charge Diffusion	10-700 nm	2000-500.000 #/cm ³

Referenceudstyret er primært designet til at blive benyttet i beskyttede miljøer, hvor det ikke udsættes for vind, vejr og voldsom behandling. Til udendørs valideringskampagner er Teknologisk Instituts måletrailer benyttet. Traileren er et mobilt laboratorium, der er specialbygget til at tage referenceudstyr med ud i felten og holde udstyret under de rette betingelser, som kan ses på FIGUR 2.



FIGUR 2. Måletrailer på byggepladsen til on-site-validering af sensornetværkets partikelmålinger.

6.2 Dataopsamling fra byggestrøm, skurvogne og visualisering

Målere på både hoved- og undertavler opsættes for at opsamle data på byggestrømmen. I TABEL 2 ses et overblik over de opsatte sensorer, type af måleinstrumenter, samt en liste med opsamlet måledata. Hovedtavlen omfatter hele byggestrømmen, inklusiv skurbyen, og måles via Eastron SDM630MCT-LoRaWAN, som er en multifunktionel trefaset elmåler. Samme måler benyttes også til dataopsamling på mixer-anlægget. Til pladsbelysningen benyttes Carlo Gavazzi EM340, som ligeledes er en trefaset elmåler. Dataopsamlingen blev påbegyndt primo november 2022 og forløb indtil projektets afslutning i juni 2024.

TABEL 2. En oversigt over måleinstrumenter til dataopsamling fra strømforbrug på byggepladsen fra KM-ConneX. Højre kolonne beskriver den type måledata, der opsamles med det respektive måleinstrument.

Sensorbetegnelse	Måleinstrument	Måledata
Hovedtavle	Eastron SDM630MCT-LoRaWAN	· Phase (1,2,3) L/N volts THD • · Current – L1, L2, L3 • · L1, L2, L3 total kWh • · Total kWh • · L1, L2, L3 active power • · L1, L2, L3 power factor
Mixer anlæg		• · Phase 1,2,3 Current THD • · Total power factor • · Total active power • · Total reactive power • · Total apparent power • · Import Reactive Energy

Sensorbetegnelse	Måleinstrument	Måledata
		• Neutral Current • Total power factor • Frequency
Pladsbelysning 1	Carlo Gavazzi EM340	• PF L1, L2, L3 • PF sys • Kvarh (+) TOT
Pladsbelysning 2		• kWh – total • Voltage - phase 1, 2, 3 • Effect – phase 1, 2, 3 • A – L1, L2, L3 • Frequency

Af KM ConneX opbygges et transmissionsnetværk via en LoRaWAN gateway og netværksserver, som sørger for kommunikationen mellem måleinstrumenterne på byggepladsen og en given backend. Måledata lagres i en database, og kan tilgås digitalt. Transmissionsnetværket lægger en begrænsning på tidsopløsningen af dataoverførsler på minimum 10 minutter. For at kunne monitorere og analysere elkvalitetsparametre ville det kræve en højere tidsopløsning, hvorfor en læring fremover kunne være at klarlægge ønskede dataudtræk og tidsopløsninger, før transmissionsnetværket designses.

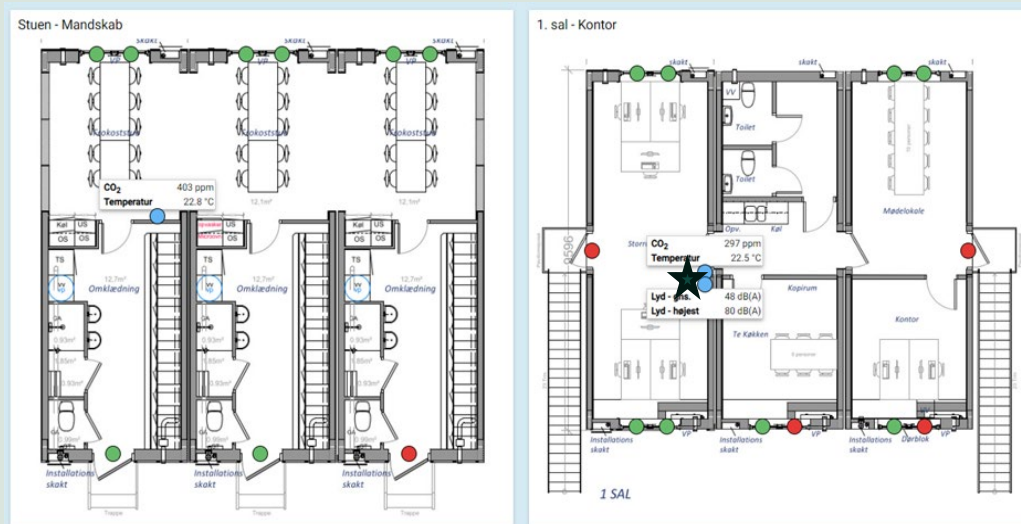
I skurbyen opsættes målere til dataopsamling af strømforbrug, strømproduktion, indeklimate parametre samt monitorering af døre og vinduer. I TABEL 3 ses et overblik over de opsatte sensorer, type af måleinstrument og liste med opsamlet måledata fra KM ConneX. Skurbyen består af i alt seks skurvogne, hvor strømforbruget måles særskilt på hver vogn. På taget af skurvognene er solcelleanlægget SunCap opsat, hvor strømproduktionen også måles.

Som en del af smart-energi-løsninger implementeres sensorer på døre og vinduer i skurvognene, med henblik på at undgå unødigt brud på klimaskærmen gennem øget monitorering. Disse placeres ved hver dør eller vindue, og måler om den er åben (1) eller lukket (0). Indeklimaet i skurvognene måles på både CO₂-niveauet, temperaturen samt lydniveauet for både en peakværdi og en gennemsnitlig værdi.

TABEL 3. En oversigt over måleinstrumenterne til dataopsamling på skurbyen for henholdsvis strømforbrug, strømproduktion, indeklimate parametre samt monitorering af døre og vinduer fra KM ConneX. Højre kolonne beskriver den type måledata der opsamles med det respektive måleinstrument.

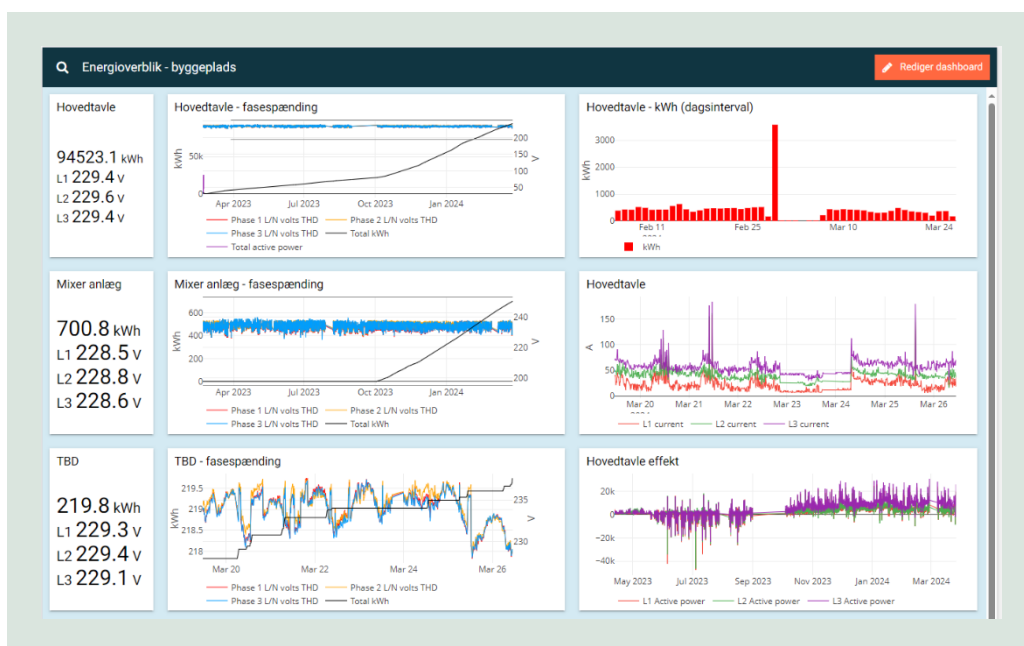
Sensorbetegnelse	Måleinstrument	Måledata
Kontor skurvogne 1	Carlo Gavazzi EM340	• PF L1, L2, L3
Kontor skurvogne 2		• PF sys
Kontor skurvogne 3		• Kvarh (+) TOT
Mandskab skurvogne 1		• kWh – total
Mandskab skurvogne 2		• Voltage - phase 1, 2, 3
Mandskab skurvogne 3		• Effect – phase 1, 2, 3
SunCap solcelleanlæg		• A – L1, L2, L3 • Frequency
Dør switch	Milesight Magnetic Contact Switch	Digital switch (0/1)
Vinduer switch	ELSYS EMS Door	Digital switch (0/1)
CO ₂ -niveau	ELSYS ERS2	CO ₂ -level
Temperatur		Temperatur

Transmissionsnetværket for måledata på skurbyen er den samme som beskrevet for byggestrømmen. Foruden de præsenterede sensorer i TABEL 3, suppleres der med en Airnode sensor fra luftforurenings-sensornetværket på 1. sal i kontormodulerne. Placeringen af Airnode sensoren samt indeklimasensorerne og monitoreringen af døre og vinduer er markeret i FIGUR 3. Figuren er et udklip fra dashboard på Oaksystem.io, som viser plantegningen af skurbyen med markering af de relevante sensorer.



FIGUR 3. Her ses placeringen af sensorerne på byggepladsen. De blå cirkler er henholdsvis CO₂- og lydmålere fra KM ConneX. De grønne og røde cirkler er døre og vinduer. Farven indikerer om de var åbne (rød) eller lukkede (grøn) i øjeblikket, der præsenteres i kortet. Den blå stjerne er AirNode luftkvalitetssensor fra DevLabs.

Det opsamlede data visualiseres via dashboard på Oaksystem.io fra KM ConneX med henblik på intuitiv monitorering, som vist i den følgende FIGUR 4.



FIGUR 4. Her vises et udklip fra dashboard på Oaksytem.io fra KM ConneX for et energi-overblik på byggepladsen.

6.3 PEMS-målinger på maskiner

Måling af emissioner fra entreprenørmaskinernes røggas er foretaget med AVL M.O.V.E. PEMS (Portable Emissions Measurement Systems), der er monteret på pæleboremaskinen. Udstyret er oprindeligt udviklet til måling af Real Driving Emissions fra vejgående køretøjer, men er også velegnet til realtidsmålinger på entreprenørmaskiner. PEMS-udstyrets samlede vægt er ca. 50 kg. Derudover medfølger varmeslanger i forskellige længder, der bruges til at lede røggas fra udstødningen til PEMS-udstyrets integrerede gasanalytatorer. Normalt forsynes udstyret med strøm fra en litumbatteri-pakke, der sikrer cirka tre timers drift.

Gaskoncentrationer af CO₂, CO, NO₂, NO (NO_x) og O₂ samt koncentrationer af partikelantal måles via en lille røggas-delstrøm, der ledes igennem integrerede gassensorer i PEMS udstyret, som ses på TABEL 4. Via et tilhørende flow tube med integreret termoelement, der monteres i forlængelse af udstødningsrøret, måles udstødningsstrøm og temperatur. Det anvendte flow tube har dog en begrænset flow-kapacitet, og kan f.eks. ikke anvendes på kraftige pæleboremaskiner.

I projektet blev test foretaget på den nævnte pæleboremaskine og gravemaskiner. For gravemaskinerne er der defineret konkrete graveopgaver, som vil danne genstand for de udførte test. De valgte graveopgaver er, "grave og læsse", "grave rende" og "afretning af flade", som er karakteriseret ved at være typiske opgaver, som gravemaskiner vil udføre på byggepladser.

De opsamlede måledata fra de udførte test behandles med styreenheden AVL M.O.V.E System Control Unit, der kobles direkte til en PC eller via en trådløs forbindelse. Med AVL Concerto softwaren foretages emissionsberegninger, der kan eksporteres til andet software - f.eks. Excel. For de maskiner, hvor CAN-bus (Controller Area Network) data kan udlæses i realtid, kan afstemte motor- og emissionsdata plottes.

TABEL 4. AVL M.O.V.E Portable Emissions Measurement System.

Gas komponent	Måleprincip	Måle område
CO og CO ₂	Non-dispersive (NDIR)	Infra-Red 0-20 % vol. CO ₂
NO og NO ₂	Non-dispersive (NDUV)	Ultra-Violet 0-5 % vol. CO
O ₂	Electro-chemical cell (EC)	0-5000 ppm NO
PN (Partikeltæller)	Diffusion charge	0-2500 ppm NO ₂

6.4 Støjmålinger på maskiner

Til at foretage støjmålinger på maskiner i projektet er der anvendt en præcisionslydtrykmåler (2-kanal, Brüel & Kjær 2270G4), som simultant måler øjeblikkelige lydtrykniveauer og registrerer de varierende niveauer som funktion af tid og frekvensfordeling. Desuden udføres en digital lydoptagelse til brug ved analyser og evt. bestemmelse af tonestøj. Alle målekæder er blevet kalibreret før målingerne med en lydtrykkalibrator (Brüel & Kjær 4231). De rå lyddata, der genereres ved støjmålinger i projektet, er analyseret med analyseprogrammet Brüel & Kjær 5503. Analyserne er baseret på korte tidsudsnit, der er identificeret ud fra håndskrevne noter, frekvensindhold og variation i totalniveau.

Støjniveauerne i kabinen på de maskiner, der har indgået i test, måles som A-vægtede lydtrykniveauer vha. to mikrofoner, der er placeret ca. 15 cm fra operatørens ører, når denne sidder på førersædet med ansigtet vendt fremad. De opfangede signaler ledes via to forlængerledninger ud til en lydmåler uden for maskinen, hvor lydteknikeren står og opsamler målinger ved forskellige motoromdrejningstal. Maskinernes eksterne støjniveauer er målt i afstand af ca. 15 meter fra maskinen og med mikrofoner, der er monteret på et højt stativ i 2,5 meters højde. Maskinerne blev opereret ubelastet og belastet hhv. uden og med grus i skovlen ved forskellige omdrejningstal. Der blev foretaget målinger fra flere sider af maskinerne. Lydmålingerne blev registreret over tid, for derved at bestemme gennemsnitsværdier af forskellige driftsforhold, og i et forsøg på at udelukke de mange forstyrrelser fra trafik og øvrige støjende aktiviteter på byggepladsen. I praksis viste dette sig vanskeligt, da baggrundsstøjen var uforudsigelig og højere end forventet.

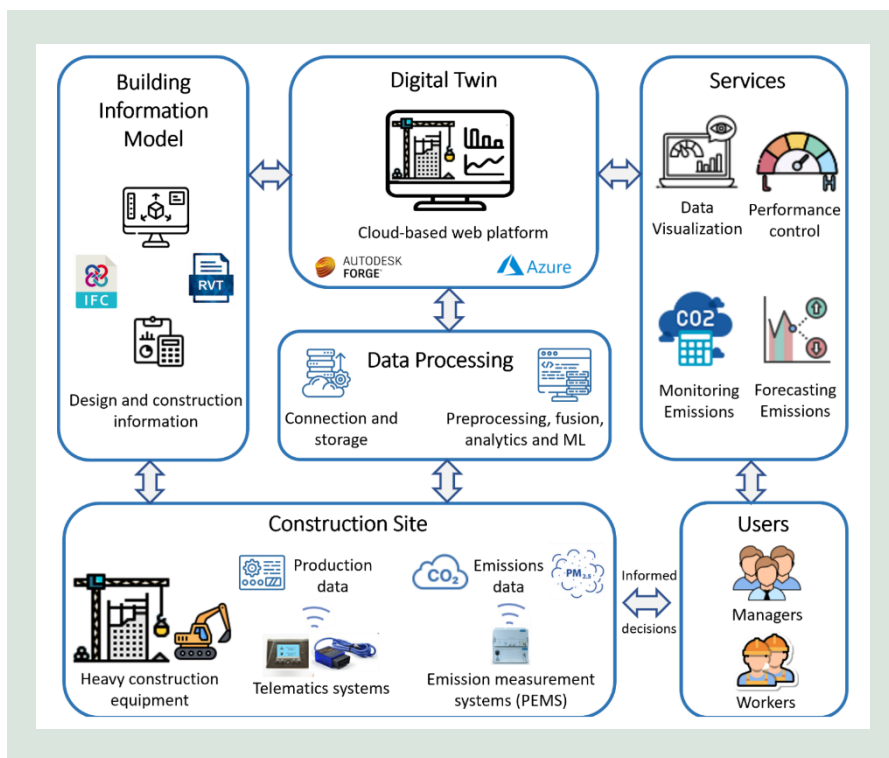
6.5 Digital twin-model

En Digital Twin platform (DT) for en byggeplads er oprettet til overvågning og forudsigelse af emissioner fra tungt byggeudstyr. Dette kapitel forklarer metodologien til udvikling af DT-rammeverket.

Rammeverkets hovedlogik består i at integrere data om emissioner fra tungt udstyr og byggepladsdata inden for en Digital Twin Platform (DTP), der kan tjene flere anvendelser. DTP'en er en cloud-baseret webapplikation, der kan tilgås via browseren. Dermed skitseres tre hovedprocesser i rammeverket:

1. Udvikling af DTP.
2. Indsamling af byggepladsrelaterede data (data om udstyrs emissioner, byggepladsmodeller og projekthinformation).
3. Behandling af data inden for DTP'en.

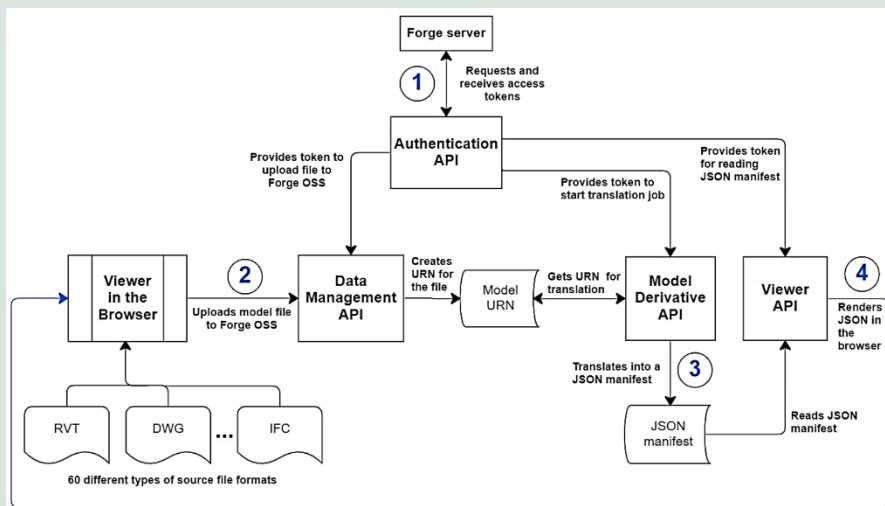
Udviklingen af rammeverket baseres på en byggesag leveret af virksomheden Aarsleff. FIGUR 5 viser et overblik over DT-rammeverket, som vil resultere i en DTP, der leverer tjenester til sine brugere for at træffe informerede beslutninger.



FIGUR 5. Overblik over Digital-Twin framework.

Udvikling af digital twin miljø

For at udvikle platformens miljø er det nødvendigt med viden om webudvikling samt adgang til Autodesk Platform Services (APS). APS er Autodesk's cloududviklingsplatform, der består af webservice Application Programming Interfaces (APIs), som gør det muligt for udviklere at bygge webapplikationer og løsninger, der udnytter BIM-workflows og Autodesk-produkter. APS blev valgt til dette projekt, da det i øjeblikket er den mest populære løsning på markedet, der muliggør direkte integration af BIM-modeller i webapplikationer. Det primære programmeringssprog, der blev brugt gennem hele projektet, var JavaScript, understøttet af HTML (Hyper Text Markup Language) og CSS (Cascading Style Sheet), som almindeligvis anvendes til design af websider. JavaScript er det foretrukne programmeringssprog blandt udviklere til at bygge kraftfulde og interaktive webapplikationer, og er også det primære sprog, der anvendes i Forge-biblioteker og APIs. Alle scripts til opbygning af DT-plattformen blev skrevet i Visual Studio Code. Processen for opsætning og visning af DT-miljøet er vist i FIGUR 6.



FIGUR 6. Trin og API'er til visualisering af en model i Forge Viewer.

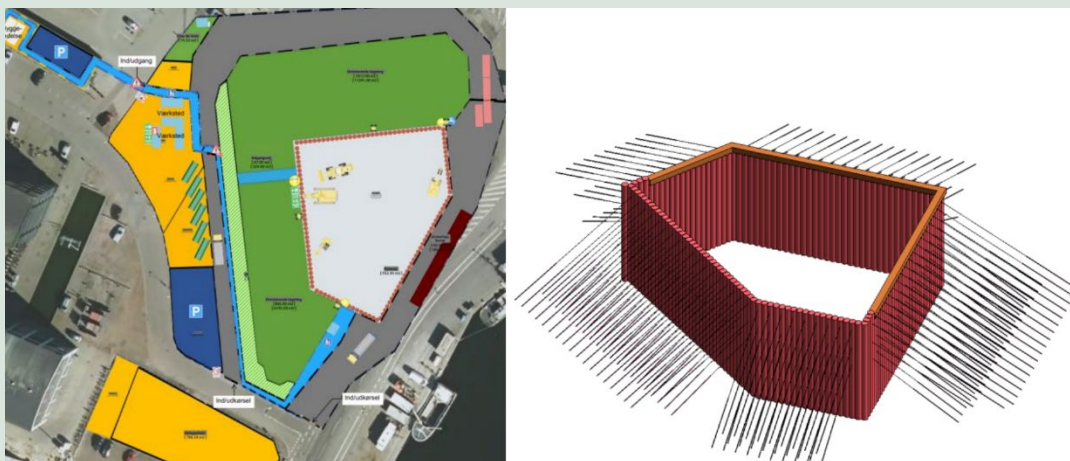
Modellering

Dette trin refererer til processen med at indsamle design- og konstruktionsdata om projektet og skabe en byggeplads-BIM-model til DT'en. På tidspunktet for -projektet var byggeplanen på fundamentstadiet, hvor en sekantpælevæg blev installeret. Rammeværket blev derfor udviklet med hensyn til boring af sekantpælevæggen og udgravning. FIGUR 7 viser et billede af byggepladsen fra boreaktiviteterne startede i oktober 2022.



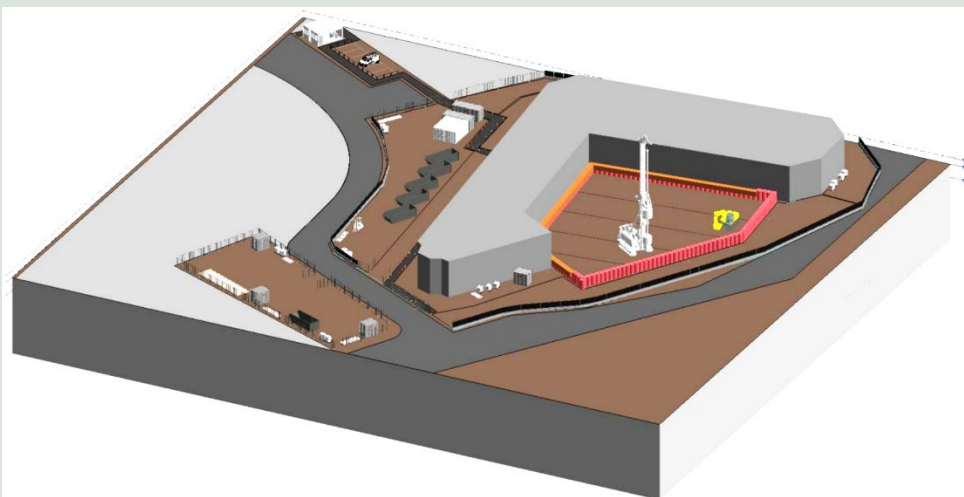
FIGUR 7. Byggeplads set af et time-lapse kamera på en nabobygning.

En strukturel modul af sekantpælevæggen blev leveret sammen med byggepladsens layout, maskinmodeller og oplysninger om installationen af pælene. Modellen blev modtaget i IFC-format (Industry Foundation Classes) og inkluderede terrænet, pælene og ankerne på byggepladsen. Sekantpælevæggen består af 150 betonpæle med en diameter på 1180 mm. Byggepladsens layout og den strukturelle model er vist på FIGUR 8.



FIGUR 8. Pladsoversigt (PDF-version) (venstre) og strukturel model af fundamentvægmodel (højre).

IFC-modellen importeres til Autodesk Revit, hvor den forfines til en byggepladsmodel for yderligere integration i DT'en. En af fordelene ved at bruge Forge er, at Model Derivative API'en, som oversætter modellen til viewer'en, kan oversætte mere end 60 filformater, inklusive Revit-formatet. Derfor er det ikke nødvendigt at eksportere modellen til IFC og risikere tab af information i processen. Byggepladselementerne, herunder containere, hegn, porte, gangstier, veje, kegler og maskiner, modelleres i overensstemmelse med det leverede pladslayout, billeder og pladsbesøg. To tunge maskiner var i drift på pladsen og blev inkluderet i modellen: Et boreapparat (model BAUER BG 55) og en gravemaskine (Hitachi ZX135US-6). Pladsmodellen er illustreret i FIGUR 9.



FIGUR 9. Bygnings- og byggepladsmodel ved hjælp af Building Information Modeling (BIM) metoden. Bemærk: byggeplanen er ikke synlig, men kan også visualisere fremskridtet over tid, kaldet en 4D BIM-model.

6.6 Telematikdata fra entreprenørmaskiner til digital twin model

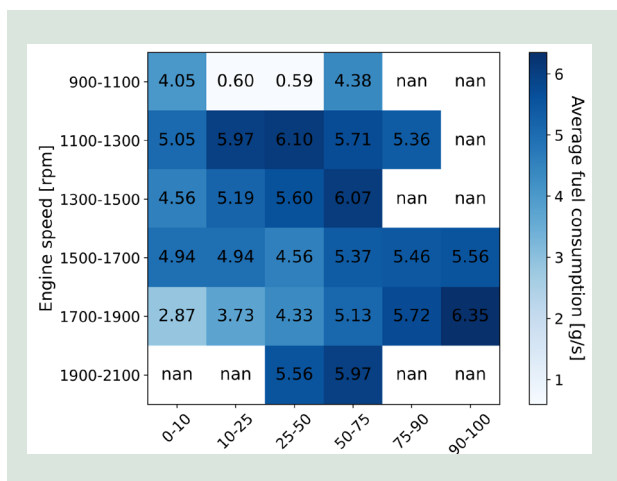
Indsamling af dynamiske telematik-data fra entreprenørmaskiner har igennem projektet været en udfordring. OEM-telematik platformene tilbyder forskellige daglige oversigter over forhold såsom driftstimer og tomgangstider. Dog leveres der ikke realtidsdata af en brugbar frekvens. Der

er arbejdet med en potentiel løsning, hvor en OBD-logger fra en af verdens førende forhandlere af OBD/CAN-loggere er koblet til diagnosestikket på en gravemaskine. Til formålet er der etableret en Microsoft Azure cloud, som understøtter de nødvendige grænsesnit og håndterer firewalls. Metoden blev dog ingen succes, idet de tilgængelige data-loggere ikke formår at få de nødvendige data ud af maskinerne. Projektet valgte derfor en alternativ og mitigerende løsning i forhold til digital twin modellens databehov. Emissions- og CAN-bus data fra tidligere målekampagner er blevet struktureret på en måde, der fungerer som empirisk input til Digital twin modeller. Der er desuden monteret sensorer på bevægelige dele af gravemaskiner til indsamling af bevægelsesdata.

Metoden til indsamling af udstyrsemissioner i dette rammeværk er baseret på at kombinere maskinernes telematikdata med emissionsrater, der er opnået for maskinerne gennem tidligere motortests ved hjælp af PEMS-teknologi. De fleste tunge køretøjer har CAN-bus-systemer, der muliggør kommunikation mellem køretøjets elektroniske styreenheder. Dette gør det muligt at logge CAN-bus data, som giver højfrekvente driftsdata om maskinen, såsom brændstofforbrug, motorturtal, motorbelastning, kørehastighed og andre parametre. Store producenter af byggeudstyr tilbyder typisk websystemer, såsom dashboards, der gør det muligt for brugere at visualisere information om maskinen via CAN-bus data. Afhængigt af maskinens leverandør kan det være muligt at hente telematikdata direkte fra leverandørens system. Det er også muligt at købe og installere CAN-loggere i maskinen og hente højfrekvente telematikdata til en ønsket server, som yderligere kan tilsluttes en GNSS-tracker. I projektet antages det, at telematikdata kan indhentes med høj frekvens (1Hz) og logges i en CSV (Comma Separated Values) fil. Det er blevet bekræftet, at det for et boreapparat som BAUER BG 55 er muligt at opnå mindst følgende dataparametre og almindelige enheder, som vil blive betragtet:

- Tidsstempel (Unix format)
- GNSS data (latitude, longitude, altitude).
- Motormoment (Newton-meter [Nm]).
- Motorturtal (Revolutions per minute [rpm]).
- Brændstofforbrug (Liter per second [l/s]).
- Samlet kilometertal (Kilometer [km]).
- Kørehastighed (Kilometer per hour [km/h]).
- Borets rotationshastighed (rpm).

Det næste skridt vil være at indsamle emissionsrater for maskinen. Ved hjælp af målesystemer til tungt udstyr, såsom PEMS, som præsenteret i litteraturgennemgangen, er det muligt at udføre målinger på maskinens motor for at bestemme koncentrationer af NO, NO₂, CO₂, CO og PN (Particle Number) i udstødningen, som derefter kan bruges til at bestemme emissionsrater i gram per kilowatt-time (g/kWh). Dog kan gaskoncentrationerne variere betydeligt i forskellige driftsformer på grund af f.eks. højere eller lavere værdier af motoreffekt. Derfor vil det at have én enkelt emissionsrate give unøjagtige resultater. Det foreslås, at emissionsrater bør beregnes for forskellige effektområder baseret på hastigheds- og momentværdier, hvilket vil give mere præcise resultater under forskellige driftsformer. Da telematikdataene registrerer motormoment og hastighed hvert sekund, bør emissionsrater angives i gram per kilowatt-sekund (g/kWs), således raten kan multipliceres med motoreffekten (i kilowatt [kW]), hvilket resulterer i emissioner i gram per sekund (g/s). FIGUR 10 er et eksempel på, hvordan brændstofforbrug kan kortlægges i forhold til emissionsrater for forskellige motoreffekt- og hastighedsområder.



FIGUR 10. Eksempel på et emissionsvarmekort for Bauer 355G boreriggen, når den er i boretilstand (baseret på 3 timers observeret arbejde).

Forbehandlingen består af at hente de rå telematikdata og forberede dem til videre behandling i DT. Det sker i et andet NodeJS-miljø udviklet i Visual Studio Code, som læser CSV-filer fra en specificeret placering og sender dem forbehandlet direkte ind i projektmappen på DT-plattformen til behandling. Først konverteres telematikdatasættet fra CSV-format til JSON-format, således det kan manipuleres i DT-miljøet ved hjælp af JavaScript. JSON står for JavaScript Object Notation, hvor data præsenteres i form af dataobjekter, som vist i FIGUR 11. JSON er et letvægtsformat til at gemme og transportere data i form af objekter og bruges ofte til at sende data til websider. I de oversatte JSON-data repræsenterer hvert objekt en datarække fra CSV-datasættet. Derefter filtreres JSON-dataene ved at fjerne objekter med gentagne tidsstempler eller fejlværdier. Tidsstempler konverteres også fra Unix-format til datoformat for bedre fortolkning. Herefter foretages en iteration gennem dataene, som udfører følgende for alle dataobjekterne:

- Motoreffekt i kW is beregnes.
- Emissionsrater tilføjes baseret på objektets værdier for drejningsmoment og hastighed ud fra en given tabel med værdier i det tidligere viste format.
- Emissionsværdier i g/s beregnes ved at multiplicere motoreffekten (kW) med dens respektive emissionsrate (g/kWs).

```

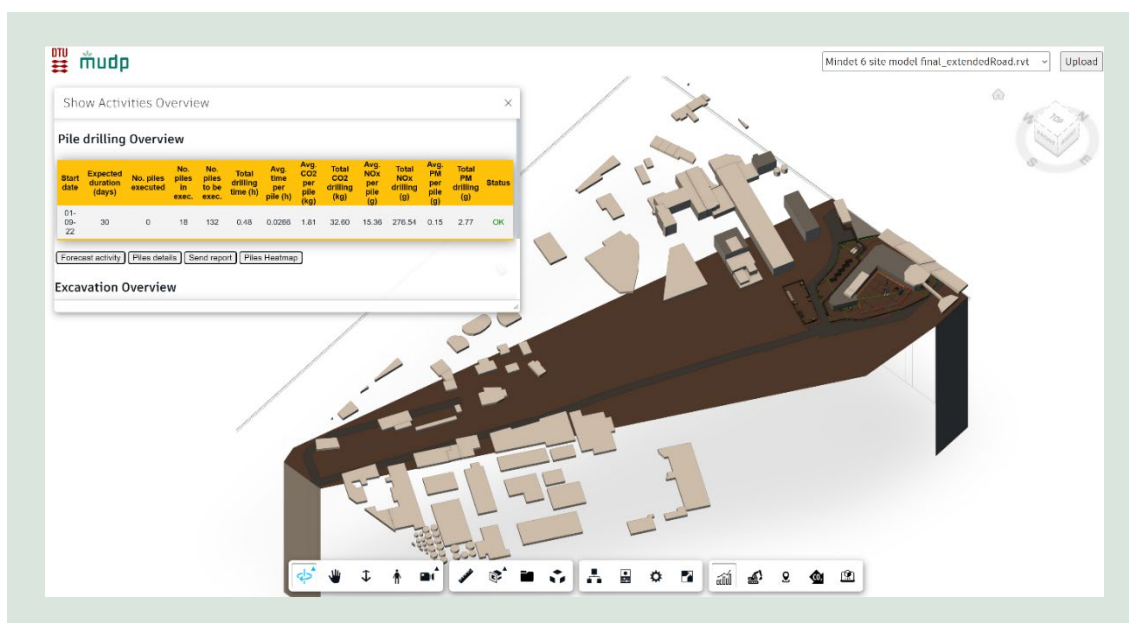
{
  "timestamp": "17/11/2022, 10.01.00", → Timestamps with 60 seconds in between.
  "x": 56.15096258, → Current position value
  "y": 10.21539797, → Current position value
  "z": 0, → Current position value
  "Distance travelled": 50, → Current value distance travelled value
  "CO2EmissionPerMin": 567.2496243795165, → Sum of CO2 emission values of the past 60 sec.
  "NOxEmissionPerMin": 4.537997360980212, → Sum of NOx consumption values of the past 60 sec.
  "PMEmissionPerMin": 0.045380333019164304, → Sum of PM consumption values of the past 60 sec.
  "FuelConsumptionPerMin": 600, → Sum of fuel consumption values of the past 60 sec.
  "maxEnginePower": 136.13990993821344, → Maximum engine power among values of the past 60 sec.
  "minEnginePower": 136.13990993821344, → Minimum engine power among values of the past 60 sec.
  "AvgEnginePower": 136.13990993821338, → Average engine power of values of the past 60 sec.
  "maxDrivingSpeed": 0, → Maximum driving speed among values of the past 60 sec.
  "minDrivingSpeed": 0, → Minimum driving speed among values of the past 60 sec.
  "AvgDrivingSpeed": 0, → Average driving speed of the past 60 sec.
  "AvgdrillRotationSpeed": 80, → Average drill rotation speeds of the past 60 sec.
  "Status": "Drilling"
},
  Result of this condition test → if (object.AvgdrillRotationSpeed !== 0) {
    object.Status = 'Drilling'
  } else if (object.AvgDrivingSpeed !== 0) {
    object.Status = 'Driving'
  } else if (object.AvgDrivingSpeed == 0) {
    object.Status = 'Idling'
  }
}

```

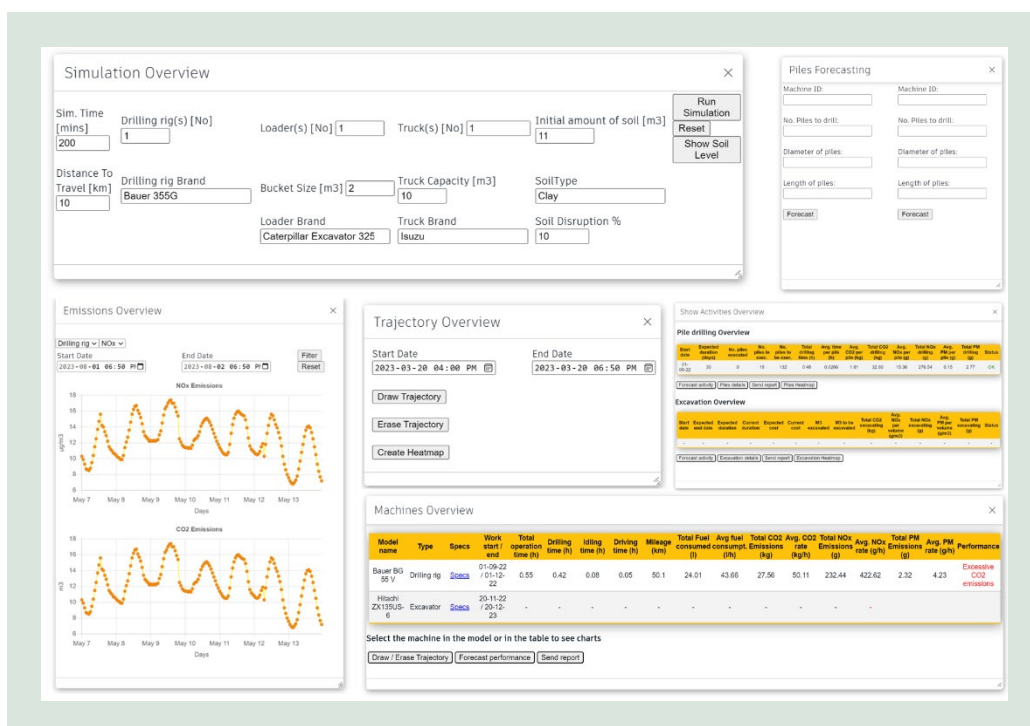
FIGUR 11. Beskrivelse af objekternes værdier efter filtrering.

Det sidste trin består i at manipulere datasættet, så det indeholder dataobjekter minut for minut i stedet for sekund for sekund. Dette gøres ved at filtrere datasættet, så kun objekter med tidsstempler hvert minut bevares, og ved at justere objektets dataværdier (f.eks. emissioner, effekt og hastighed) for at tage højde for de sidste 60 sekunder. I tilfælde af emissionsværdier og brændstofforbrug, som er angivet i gram per sekund, er minutværdier summen af værdierne inden for hver 60 sekunder. For data som effekt og hastighed er minutværdierne gennemsnittet af værdierne inden for hver 60 sekunder. For målinger som tilbagelagt distance er minutværdierne den sidst registrerede værdi hvert 60. sekund. Endelig tildeles hvert dataobjekt en "Status"-egenskab for at afspejle driftsmodus baseret på gennemsnitsværdierne for bore- og kørehastighed. FIGUR 11 beskriver værdierne for ét dataobjekt efter filtrering sammen med angivelser af, hvordan disse værdier blev opnået.

Udvidelser er scripts, der udføres inden for viewer'en, når den initialiseres. I alt blev fire udvidelser udviklet, som indeholder funktioner såsom tegning af baner, visning af den sidst registrerede maskinposition, visualisering af varmekort, diagrammer og informationspaneler. Brugergrensefladen (UI) på DT-plattformen etableres også gennem udvidelserne. Udvidelsernes funktioner gør brug af komponenter såsom varmekort, sprites, bane-linjer, diagrammer og paneler. FIGUR 12 viser DTP's brugergrenseflade ved brug af en internetbrowser med udvidelsen "Activity Overview" åben. FIGUR 13 viser udvidelserne, der er tilgængelige.



FIGUR 12. Interface of digital twin with the extension of Activity Overview open.



FIGUR 13. Interfaces of all extensions: Activity Overview, Trajectory Overview, Simulation Overview, and Emissions Overview.

7. Implementering af sensornetværk og aktiv støvdæmpning

7.1 Sensornetværk installeret og driftet

For at øge mulighederne og kvaliteten af dokumentationen fra en byggeplads er et sensornetværk implementeret til monitorering af fine partikler (PM2.5) og støj fra byggepladsen, samt CO₂-koncentrationen indendørs i skurbyen. Muligheden for monitorering af vind, regn, NO₂ fra entreprenørmaskinerne og ozon er blevet undersøgt, men er ikke blevet integreret i dette projekt. Driften af sensornetværket har løbet fra marts 2022 til maj 2024.

Demonstrationen bestod af opsætning og drift af et sensornetværk, der kan skabe et videns- og erfaringsgrundlag for entreprenøren i fremtidige projekter. Den viden og erfaringsgrundlaget kan medvirke til at vinde tilbudssager og være i overensstemmelse med myndighedskrav og ønsker om opnåede certificeringer indenfor f.eks. LEED og DGNB. Ved at måle på støj, støvdannelse og eksponering for det, kan beslutningsprocesserne i arbejdet hen mod forbedring af arbejdsmiljøet for medarbejdere på byggepladsen forbedres.

Design af sensornetværket

Sensornetværket er designet til at dække hele byggepladsen med særlig fokus på sydvestsiden af bygningen, hvor Aarsleffs del af byggeriet finder sted. Sensorerne er som udgangspunkt placeret i to-tre meters højde bortset fra fire sensorer, der er placeret på bygningens tag. Se FIGUR 14.

Afdækning af forskellige vindretninger samt indflydelsen af andre lokale kilder er taget i betragtning. Da det er et kendt fænomen, at en væsentlig del af partikelforureningen i Danmark kommer langvejs fra, er de lokale sensorer på byggepladsen suppleret med to sensorer, der måler bybaggrunden i Aarhus. Den ene er placeret på et tag på Teknologisk Institut (Kongsvang Alle 41, 8000 Aarhus C). Den anden er placeret sammen med DCEs nationale målestation i byens Botanisk Have (Peter Holms Vej 10A, 8000 Aarhus C).

Sensorerne har skiftet placering undervejs alt efter, hvad der har været muligt. For eksempel har hegnet, hvor en stor andel af sensorerne har været placeret, været flyttet eller nedtaget i perioder. Desuden var mange sensorer i starten placeret på murene af den bevarede bygning, men måtte undervejs flyttes grundet renovering af bygningen.

Til de efterfølgende analyser er data fra forskellige kombinationer af sensorerne blevet anvendt for alle fokuspunkterne i analysen.



FIGUR 14. Overblik over sensornetværket som det så ud i oktober 2023. De røde prikker er gas- og partikelsensorer og de gule prikker er støj- og vindsensorer.

Drift af sensornetværket

Igennem projektet er det erfaret, at vedligehold og drift af et sensornetværk på en byggeplads er ressourcekrævende, da en byggeplads er dynamisk og byder på forskelligartede aktiviteter på et lille areal. Det har medført uforudsete udgifter til elektrikerregninger.

De to primære muligheder for at hænge sensorerne op var byggehegnet rundt om byggepladsen og facaden af bygningen. Byggehegnet blev flere gang flyttet af hensyn til byggeprocessen og facaden skulle renoveres, hvorfor sensorerne ofte er blevet flyttet og manuelle og dermed tidskrævende tjek af sensorpositionerne har været nødvendige.

Desuden er sensorerne ikke altid blevet tilsluttet strøm efter flytning, hvorfor den høje grad af dynamik på pladsen førte til jævnlige strømodfald, hvor kabler eller strømgrupper blev koblet fra. Desuden har byggepladsens skiftende medarbejdere udfordret kommunikation ift., hvordan sensorerne skulle håndteres. Et par sensorer er gået tabt, da hegnet, de var placeret på, er blevet lagt ned i regnvejr, hvorfor der er trængt vand ind i sensoren.

De sensorer, der har siddet på uforstyrrede positioner, har dog kørt med lavt vedligehold. I løbet af de mere end to år, hvor sensorerne har været i drift, har det kun været nødvendigt at genstarte en enkelt af dem én gang.

For at undgå længere, ubemærkede udfald blev der indført en servicemeddelelse, som blev sendt ud via mail til de netværksansvarlige, hvis en sensor havde været offline i mere end 24 timer. Det tiltag viste sig effektivt for at undgå længere udfald.

De vindsensorer, der har været anvendt i sensormodulerne i projektet, skal manuelt indstilles så de vender rigtigt i forhold til verdenshjørnerne. Med de mange flytninger af sensorer var det svært at være sikker på, at de altid vendte rigtigt, og om det derfor var muligt at stole på vindretningen. En vigtig læring er, at selvkalibrerende vindsensorer vil være at foretrække i et dynamisk miljø.

I løbet af projektet blev det klart, at yderligere sensordata kunne have givet værdi. Det drejede sig om en regnsensor, som kunne være med til at afdække lokale regnbyger eller tågebanker. Det vil give direkte værdi for Aarsleff i forhold til at kunne dokumentere på de dage, hvor vejret er så dårligt, at byggeprocessen skal sættes i stå. Det vil også kunne være med til at afklare om forhøjede koncentrationer af PM2.5 skyldes støv og partikler fra byggeprocessen eller vanddråber. På den måde kan fejlfortolkninger undgås. Det er et velkendt fænomen, at høj luftfugtighed påvirker partikelsensorer, der anvender lysspredning som måleteknologi. Derfor er det vigtigt, at partikelsensornetværk i fremtiden suppleres med komplette vejrstationer.

I forhold til partikelsensoren kan der med fordel benyttes et sensormodul, som også måler større partikler. De fine PM2.5 partikler, som vi har målt på i dette projekt, er kendt for at være sundhedsskadelige. Men de kan ikke ses med det blotte øje og virker ikke nødvendigvis generende under udsættelse. De partikler, der kan detekteres med det menneskelige øje, og som umiddelbart virker generende er PM10 og derover. For at få en bedre sammenhæng mellem det målte og det opfattede støvniveau vil det være en fordel at supplere målingerne af PM2.5 med målinger af større partikler. Sensorer til større partikler har ikke været afprøvet i dette projekt. Udenfor projektet har både DevLabs og Teknologisk Institut haft god erfaring med sensorsystemer til PM10 og derover.

Derudover er der blevet efterspurgt en vibrationssensor, som kan være med til at dokumentere om byggepladsen overholder krav til vibrationsforurening af omgivelserne.

Overdragelse af sensornetværket til Aarsleff

For at teste om et sensornetværk, som det opsatte, vil fungere i praksis når det drives videre af entreprenørens eget personale, blev driften af sensornetværket i efteråret 2023 overdraget fra Teknologisk Institut til Aarsleff. I forbindelse med overdragelsen har Aarsleff arbejdet med at samkøre data fra KM ConneX og DevLabs i et dashboard. Dette dashboard skal på sigt give relevante medarbejdere et hurtigt og let overblik for nødvendige input fra sensorerne. I overdragelsen blev der desuden eksperimenteret med hybride sensorer, som var udstyret med solceller, batteri og GPS. Tanken var, at de hybride sensorer ville være mere pålidelige og kræve mindre vedligehold, da de ikke længere var afhængige af at være koblet til elnettet med en ledning, og at flytninger kunne registreres automatisk fremfor manuelt. Aarsleffs erfaring med den første udgave af hybridsensorerne er, at de er ustabile, og derfor skal videreudvikles før de fungerer som et godt alternativ til kablede sensorer.

Aarsleff har vurderet, at det er relevant at fortsætte arbejdet med sensornetværk på byggepladsen. De stigende krav til dokumentation af forbrug på byggepladsen, har gjort at Aarsleff i første omgang vil forsøge sig med en modificeret udgave. Den modificerede udgave vil primært fokusere på forbrugsdata som vand og energiforbrug. Her vil erfaringer fra projektet bl.a. danne grundlag for visualiseringer med live data i dedikerede dashboards.

Resultater af kalibreringskampagner

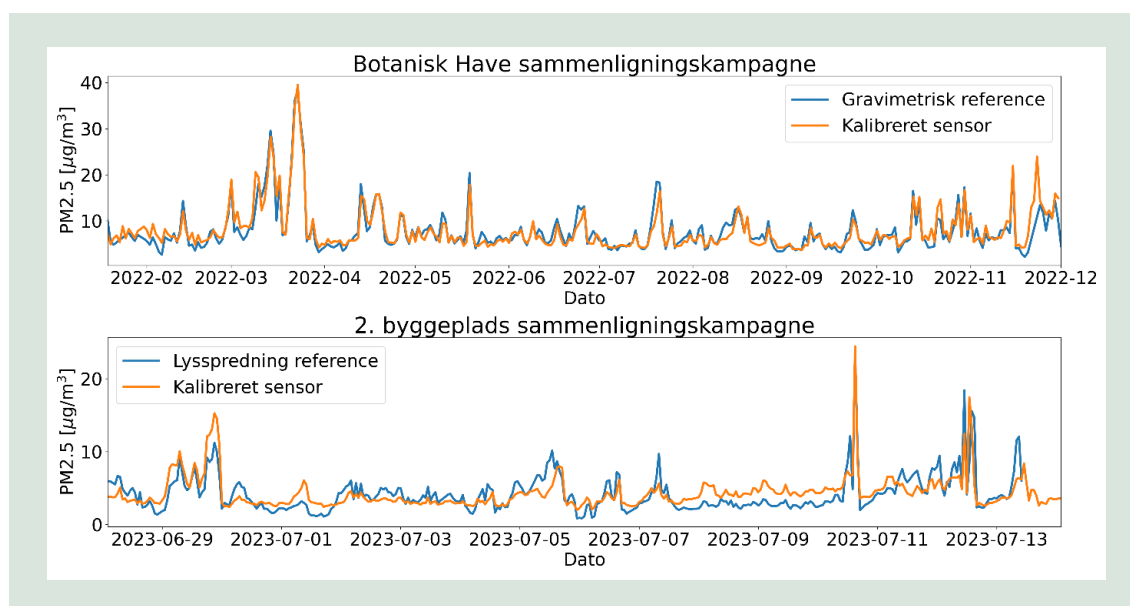
Efter sensorerne blev sat op på byggepladsen er enkeltsensorer løbende sammenlignet med forskelligt referenceudstyr for kvalitetssikring af data og mulighed for kalibrering. Der er kørt fire sammenligningskampagner:

1. Botanisk Have i Aarhus: Sammenligning med DCE's nationale reference målestation for luftkvalitet. Jan. 2022 – Okt. 2022

2. Byggeplads: Lysspredningsreference (OPS). Okt. 2022 – Nov. 2022
3. Teknologisk Institut, Kongsvang Allé Aarhus: Lysspredningsreference (OPS). Mar. 2023 – Apr. 2023
4. Byggeplads: Lysspredningsreference (OPS). Jun. 2023 – Jul. 2023

For hver af de fire kampagner er én af AirNode sensorerne blevet udvalgt til at sidde inden for en meter af luftindtaget til referenceudstyret, hvormed en ensartet koncentration af partikler (PM2.5) må forventes.

Resultaterne viser en god overensstemmelse mellem AirNode sensorerne og de gravimetrisk målinger fra den nationale målestation, øverst i FIGUR 15. Overensstemmelsen med de lysspredningsbaserede målinger foretaget med OPS og DustTrak i måletraileren, som er illustreret på nederste graf i FIGUR 15, er lidt mindre, men stadig god. Den tilsyneladende dårligere overensstemmelse kan skyldes en kortere måleperiode, og at hvert datapunkt er midlet over kortere tid.



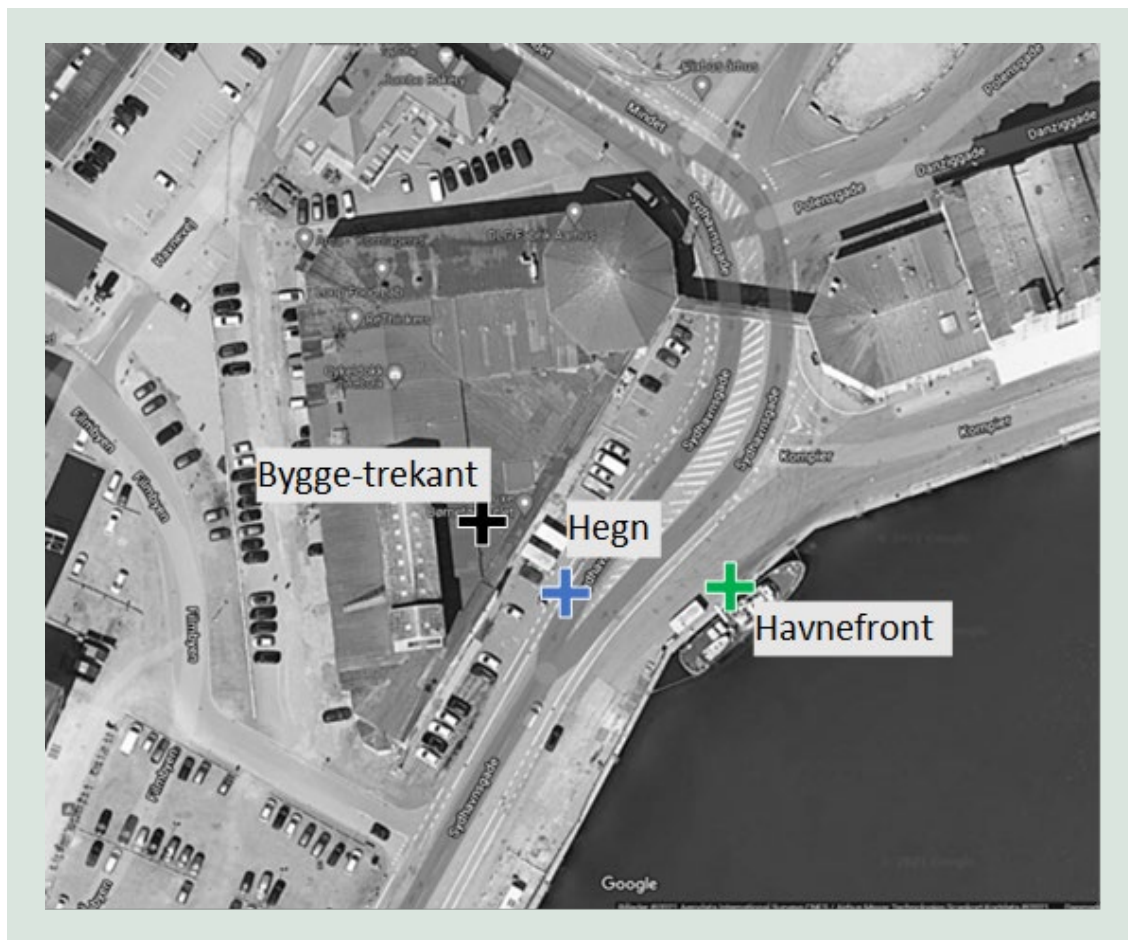
FIGUR 15. Uddrag af resultater fra sammenligningskampagnerne. Øverst sammenligning mellem AirNode og DCE's nationale målestation i Botanisk Have i Aarhus. Nederst sammenligningskampagne direkte på byggepladsen.

Det kan konkluderes, at det opsatte sensornetværk med god overensstemmelse kan bestemme mængden af PM2.5 i luften på byggepladsen med en usikkerhed på $\pm 33\%$ i de to viste kampagner.

Resultater for byggepladsens bidrag til partikeludledning

Byggepladsen ligger i et område med industri, der potentielt også kan bidrage med partikler og støv i nærområdet. Blandt andet ligger der en kornfabrik, en vej og en kaj til krydstogtskibe tæt på. For at dokumentere, hvorvidt partikler målt af sensorerne på byggepladsen primært kommer fra pladsen eller fra omgivelserne, blev tre sensorpositioner udvalgt med tre forskellige afstande til det aktive område, samt to baggrundssensorer. Positionerne blev valgt således én sensor befandt sig helt tæt arbejdsområdet i den såkaldte bygge-trekant, én befandt sig på grænsen af byggeareal på et hegn, og én befandt sig på den anden side af den offentlige vej ved havnefronten. De tre placeringer udgjorde en linje, der gjorde det muligt at undersøge, hvorvidt partiklerne primært kom med vinden fra vejen, fra havnen eller kornfabrikken i stedet for fra det aktive

byggeområde. De to baggrundssensorer blev brugt til af udregne den gennemsnitlige partikelkoncentration i Aarhus, bybaggrunden, på to steder, der ikke er påvirket af nærliggende lokale kilder såsom industri og store veje.

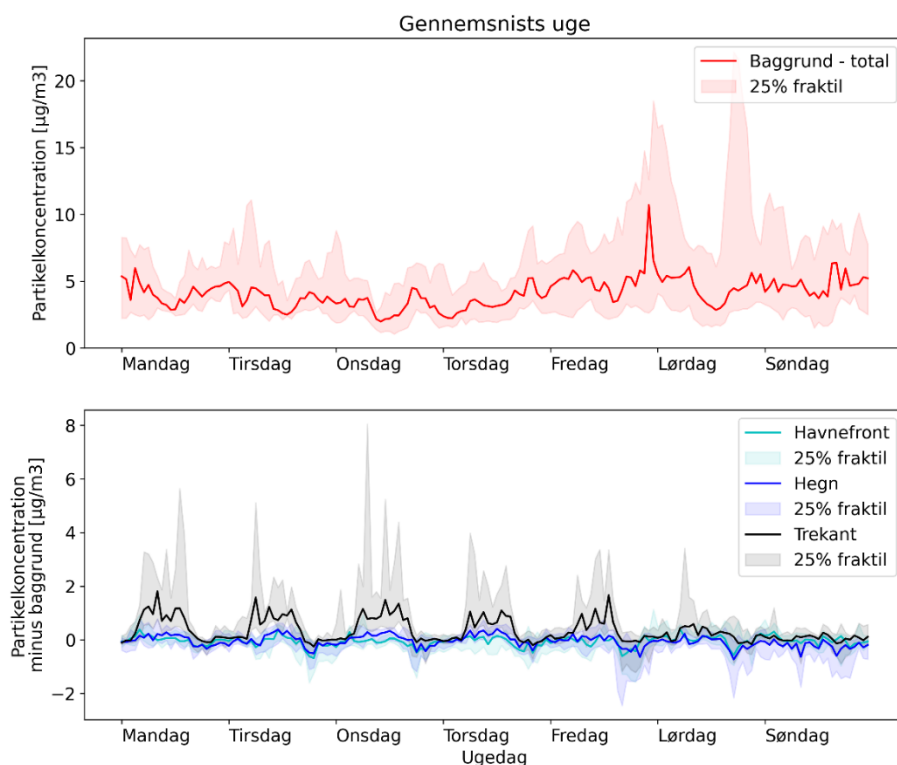


FIGUR 16. De tre sensorplaceringer, der bliver benyttet til sammenligningen.

Der blev kigget på data for perioden september 2022 til midt februar 2023. Feriedage blev trukket ud af data, hvorefter der blev beregnet en gennemsnitsuge for perioden. Denne gennemsnitsuge med uge til uge afvigelser i form af 25 % fraktiler kan ses i FIGUR 17. Øverste del af figuren viser den gennemsnitlige bybaggrund, og nederste del af figuren viser det lokale partikelbidrag.

Resultaterne viser tydeligt, at der helt inde ved det aktive byggeområde er et bidrag af partikler direkte fra byggeprocessen. Det fremgår ved, at partikelkoncentrationen er højest inde i byggetrekanten på hverdage inden for den normale arbejdstid. Samtidig viser resultaterne, at der ikke er et lokalt bidrag til partikelforureningen udenfor den normale arbejdstid. Det tyder dermed på, at det målte støvbidrag primært kommer fra byggeprocessen og ikke fra andre nærliggende kilder. At der ikke er et målbart forhøjet partikelbidrag på hegnet og på havnefronten viser desuden, at vinden hurtigt spreder partiklerne.

Ved en sammenligning med bybaggrunden er der målt et partikelbidrag fra byggepladsen på omkring $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ i løbet af en arbejdsdag på en gennemsnitsuge, som vist på FIGUR 17. Det svarer til en fjerdedel af baggrundskoncentrationen for hele Aarhus.



FIGUR 17. Støvniveauer i en gennemsnitsuge. Den øverste figur viser bybaggrunden (gennemsnit af målingerne fra de to baggrundssensorer i henholdsvis Botanisk Have og på Teknologisk Institut) og variationen mellem ugerne i form af øvre og nedre 25 % fraktil. Den nederste figur viser koncentrationerne på byggepladsen med bybaggrunden fratrasket for de tre fokuspositioner.

Resultater af partikelbidrag fra forskellige faser i byggeriet

En sammenligning mellem aktiviteter på byggepladsen og målinger af støv og støj kan være første skridt hen mod at vise, hvor det giver mest værdi at sætte ind med tiltag for at nedsætte gener for naboer, medarbejdere og miljøet.

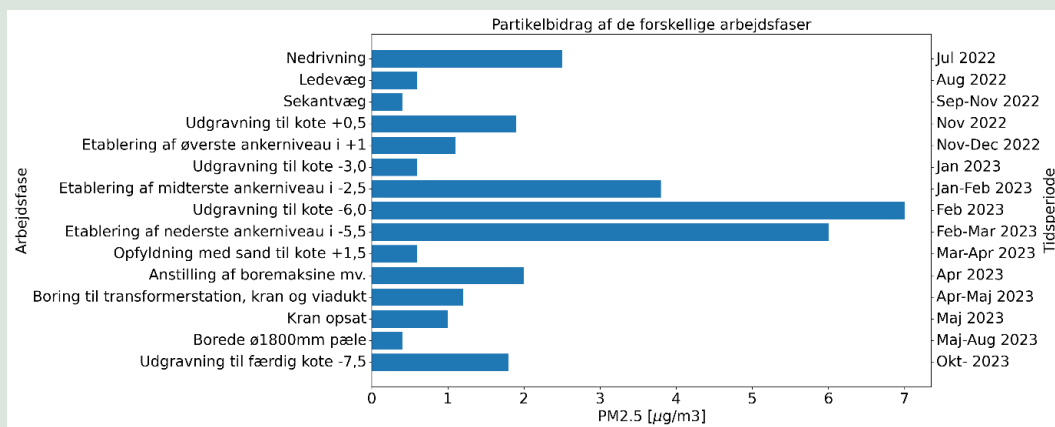
Byggeriet blev inddelt i 15 faser ud fra Aarsleffs og nedrivningsfirmaets aktiviteter. Yderligere aktiviteter er sideløbende blevet udført i perioden af bygherre, men der foreligger ingen oplysninger om hvilke eller hvornår. I forhold til sensorerne er der i analysen fokuseret på de sensorer, der var placeret omkring det aktive område for Aarsleffs aktiviteter, som er skitseret i FIGUR 18.



FIGUR 18. Placeringen af de sensorer, der anvendes til analysen. Luftkvalitetssensorerne er repræsenteret af røde etiketter, mens støj og vind er repræsenteret af gule etiketter. Området, hvor de fleste byggeaktiviteter fandt sted, er fremhævet med gult.

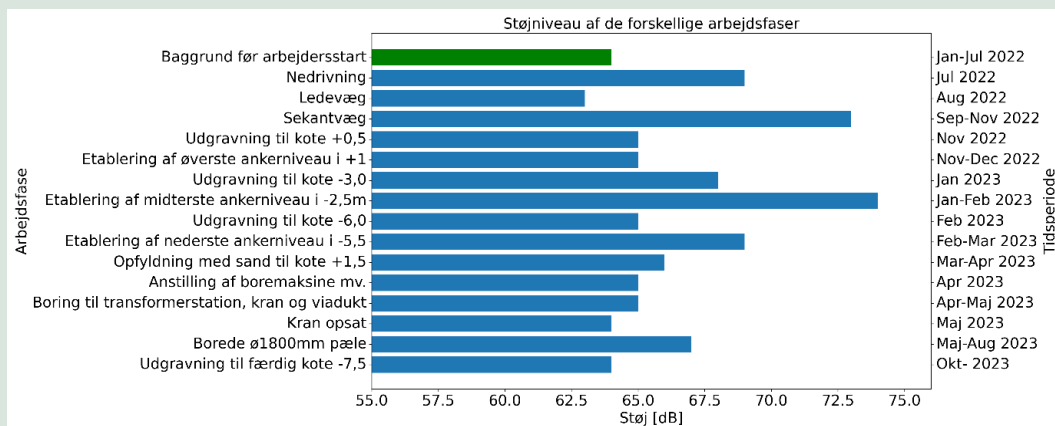
I arbejdstiden på hverdage fra juli 2022 til oktober 2023 er der i gennemsnit målt et lokalt bidrag til partikelkoncentrationen (PM_{2.5}) på 2 µg/m³ og et totalt støjniveau på 67 dB.

Det er værd at bemærke, at det gennemsnitlige lokale partikelbidrag for den fulde periode på 16 måneder er højere, end hvad der blev målt i de seks måneder, som blev sammenlignet ovenfor. Det kan skyldes at de højeste målte koncentrationer er målt efter 6-månedersperioden. Det højeste lokale bidrag er målt under udgravning og ankerniveauetablering, som foregik hen over vinteren 2023, som vist på FIGUR 19. I den periode blev der på de udvalgte sensorer målt en lokal median koncentration på 7 µg/m³ ud over baggrundskoncentrationen. Et højt bidrag ses desuden i den indledende nedrivningsfase i sommeren 2022.



FIGUR 19. Lokalt partikelbidrag i de forskellige arbejdsfaser.

Med hensyn til støj har højdepunkter i støjniveauerne været mere spredt over hele projektet, som illustreret i FIGUR 20. De højeste støjniveauer er blevet observeret under etableringen af nederste ankerniveau og under opførslen af sekantvæggen. Der skal tages forbehold for, at det i projektet ikke har været muligt at undersøge, hvor støjen kommer fra. Dermed har det ikke kunne udelukkes, at den støj, der måles, kommer fra andre kilder i området. Det er under projektet blandt andet blevet konstateret, at der længere nede af vejen har været en anden byggeplads, som har banket fundamenter i.



FIGUR 20. Støjniveau i de forskellige arbejdsfaser.

Konklusioner

Resultaterne fra casen viser, at det har været muligt at opsætte samt drifte et fuldt sensornetværk på byggepladsen. Tilmed har det været muligt at opsamle data og afdække de lokale støvkonzentrationer. Dataindsigterne kan på sigt bruges til at evaluere effekten af konkrete tiltag.

Med 22 strategisk placerede sensorer, der har målt i alle faser af det indledende anlægsarbejde, har det i realtid været muligt at følge den aktuelle situation direkte på byggepladsen og hjemme på kontorerne.

Med baggrundssensorer har projektet kunne undersøge, hvorvidt partikelforureningen primært stammer fra byggepladsen, omkringliggende aktiviteter eller en stigning i det generelle baggrunds niveau. Ud fra de udførte analyser står det klart, at der har været en dobbelt så høj koncentration af partikler ved byggepladsen sammenlignet med baggrunds niveauet i byen. Derfor har det været altafgørende, at partikelniveau for bybaggrund er blevet målt separat på to lokationer væk fra byggepladsen, for at kunne skelne mellem partikler udefra og de lokale partikelbidrag. Det har dermed været muligt at se i hvilke faser af byggeriet, der har været de største lokale bidrag af fine partikler, og hvornår støjen på byggepladsen har været højest. I forhold til støj vil det i fremtiden anbefales, at netværket suppleres med en log eller udbygges med databehandling for at støj fra byggepladsen kan skelnes med støj fra omgivelserne.

Derudover viser resultaterne, at en strategisk planlægning og præcis uddelegering af ansvar er fundamentalt for at sikre en effektiv drift af sensornetværket. På den måde sikres en pålidelig dataindsamling og efterfølgende dataanvendelse.

Byggepladser er dynamiske arbejdspladser og kræver derfor et sensornetværket, der er justerbart, robust og flytbart. Man kan med fordel kigge ind i vind- og regnmålinger for at dokumentere vejrligsdage, således der kan arbejdes sikkert på pladsen. Samtidig kan det bidrage til at få det bedste udbytte af data fra partikelsensorerne, da sensordataene kompenserer for luftfugtighed og regndråber.

Data giver mulighed for at sammenligne partikeludledninger ved forskellige byggeprocesser. Samtidig bliver det muligt at reagere og f.eks. tilpasse arbejdsgange når der er for mange partikler i luften eller et for højt støjniveau på pladsen. Et sensornetværk kan dermed bidrage til at træffe ledelsesmæssige beslutninger, der er i tråd med den lagte strategi og målsætninger, ud fra et dokumenteret datagrundlag.

7.2 Aktiv støvdæmpning

Støv i luften udgør en sundhedsrisiko for medarbejderne på en byggeplads, og kan være til gene for borgere, som bor tæt på². Støvdannelse sker igennem adskillige processer på en byggeplads, såsom nedrivning, gravearbejde, bearbejdning af byggematerialer og håndtering af emballagerede tørprodukter. Herudover kan der udvikles støv fra færdselsveje, for eksempel ved kørsel på tørre grusveje. I dag benytter man ofte vand til støvbekæmpelse på udendørs arealer på byggepladser. Denne metode kræver store mængder vand og er tidskrævende, hvorfor projektet har gennemført forsøg med alternativ løsning. Det er bredt anerkendt, herunder af Det Nationale Forskningscenter for Arbejdsmiljø, at udsættelse for fine partikler, PM_{2.5}, giver markant øget risiko for bl.a. hjertekarsygdomme og lungekræft. Derfor har vi i dette forsøg valgt at fokusere på den partikelstørrelse.

² "Branchevejledning om Støv på Byggepladsen" (<https://bfa-ba.dk/wp-content/uploads/2018/10/Branchevejledning-om-stoev-2-print.pdf>), <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136990>, <https://doi.org/10.1039/C5EM00549C>



FIGUR 21. Placeringen af DustTraks (firkanter) og AirNode sensorer (cirkler) anvendt til analysen, samt vejarealet, hvor CMA blev spredt.

Vi har i denne del af projektet undersøgt og skabt erfaringer med brug af det aktive støvbekæmpelsesmiddel Dust-Away. Dust-Away består af CMA (calciummagnesiumacetat). Det er bionedbrydeligt og svanemærket. Videnskabelige studier viser, at CMA er et mere miljørigtigt alternativ til almindeligt vejsalt (NaCl) i snerydning og afisning³. CMA virker ved at danne en hygroskopisk belægning, der holder overfladen fugtig, og dermed binder støv og partikler.

Kampagnen bestod af fire spredninger af Dust-Away i henholdsvis maj, august og september 2023. Spredningen foregik på det primære køreområde, som ses på FIGUR 21. Ved hver af de fire spredninger blev der foretaget én spredning fra morgenstunden på dag et, hvorefter støvniveauet blev målt, og observeret i de efterfølgende dage. Resultaterne blev indsamlet via interview med to medarbejdere på pladsen, samt målinger af fine partikler i luften. Til målinger af partikler i luften blev der udvalgt fem sensorer fra sensornetværket, som var placeret tæt på det aktive område. Målinger fra disse blev desuden suppleret med avancerede partikelmålere. Der blev målt på PM_{2.5} et par dage før og efter den aktive støvbekæmpelse.

³ Arbejdsrapport Skov og Landskab no 36-200.



FIGUR 22. Spredning af DustAway 1 maj 2023. Til højre ses tanken med DustAway. Til venstre ses spredningen i aktion.

Resultater

Den praktiske spredning foregik med udstyr, der allerede var til stede på pladsen, og ikke adskilte sig væsentligt fra den gængse spredning af vand. Derfor blev det let passet ind i den gængse arbejdsrytme.

De kvalitative interview af medarbejderne pegede på, at der forud for spredningen var behov for aktiv støvbekæmpelse baseret på, at støvniveauer i luften var oplevet som værende høje, da støv kunne ses i luften og føles generende. De rapporterede samtidigt, at den aktive støvbekæmpelse efter én spredning virkede effektiv i to-fire dage under tørre periode i de pågældende kampagner. Hvis der i samme periode skulle have været anvendt vand som støvbekæmpelse forventede de erfaringsmæssigt, at der skulle være spredt 2-3 gange om dagen.

Både før og efter spredningen af DustAway blev koncentrationen af partikler i luften af størrelsen PM2.5 målt. De målte koncentrationer ved brug af ResultCMA på byggepladsen afviger i perioderne meget lidt fra baggrundskoncentrationerne i forhold til den naturlige dag til dag variation. Usikkerheden på måledata er for stor til, at effekten hverken be- eller afkræftes alene ud fra PM2.5 måledata.

Udfordringer og læring

Medarbejderne på byggepladsen har oplevet høje koncentrationer af synligt støv, men målt lave koncentration af PM2.5. Det skyldes, at partikler, herunder sandkorn, først er synligt fra omkring 50 μm og meget fint sand er defineret som sandkorn mellem partikler 63 μm og 125 μm , hvorimod de anvendte instrumenter og sensorer har målt på partikler, der er mindre end 2.5 μm . De lave koncentrationer af PM2.5, og oplevelsen af støv i luften, kan forklares med, at sensorer ikke har målt de partikelstørrelser, som har været synlige og potentielt føltes generende for byggearbejderne.

Undervejs i kampagnen har der været flere udfordringer, som har givet anledning til gode læringer. Mellem de første spredninger i maj og de sidste spredninger i august og september er belægningen på køreområdet på byggepladsen ændret fra grus til asfalt. Denne ændring gør ifølge distributøren en væsentlig ændring, da DustAway kan trænge ned i grus og mætte overfladen. Imens vil det på asfalt kun ligge i en tynd film på overfladen, som let slides af. Produktets effekt mindskes derfor væsentligt, og resultaterne for forårs- og sensommerkampagnerne kan ikke sammenlignes. Desuden vanskeliggjorde skiftende vejr og det omskiftelige arbejde på byggepladsen gennemførelsen af et effektivt måleprogram understøttet af ensartet arbejde og tørt

vejr. Fugtigt vejr og regn vil helt naturligt virke som støvbinder, og omskifteligt arbejde vil gøre det svært at sammenligne koncentrationer med og uden aktiv støvdæmpning. En yderligere usikkerhed i forsøget er, hvorvidt belægningen har været mættet. Dosis af DustAway skal ifølge distributøren justeres ind til den enkelte byggeplads' belægning, areal og arbejdsgang, hvilket har været svært i så kort en kampagne.

Konklusion

Den overordnede konklusion på støvbekæmpelseskampagnen er, at der er opnået mange læringer. Medarbejderne har oplevet en effekt af DustAway, men for at dokumentere den gennem målinger af luftkvalitet er yderligere undersøgelser nødvendige. Denne kampagne indebærer enkelte kortvarige forsøg og ikke et fyldestgørende projekt, der har kunne validere effekten af støvbekæmpelse til bunds. En længerevarende kampagne på et område med mere ensartet og kontrolleret aktivitet vil give bedre statistik, således vejrforhold og dagsvariationer kan mildes ud. Desuden vil det være gavnligt at bruge sensorer, som kan måle større, synlige partikler, da medarbejderne oplever både gener og effekt koblet med, hvad de kan se.

8. Test af energioptimerende og emissionsreducerende tiltag på entreprenørmaskiner

8.1 Test af elektrisk-, hybrid- og dieseldrivlinje på Volvos testsite i Eskilstuna

Tre Volvo-gravemaskiner med en elektrisk-, hydraulisk hybrid- og dieseldrivlinje er testet og sammenlignet ved udførelse af to karakteristiske arbejdsopgaver: grave og læsse, samt afretning af flade. Energi- og produktivetsforhold undersøges med og uden økonomifunktioner, som ECO-mode og motoromdrejningsbegrænser. ECO-mode er designet til at reducere brændstofforbruget ved at sikre mindre energi- og tryktab i hydrauliksystemet. Kampagnen er udført på Volvo Entreprenørmaskiners testcenter i Eskilstuna i Sverige.

De tre maskiner er Volvo EC230 ELECTRIC, Volvo EC220E, og Volvo EC230E HYBRID. De første to maskiner har samme type hydrauliksystem, og samme vægtsklasse, hvilket gør dem velegnede til at foretage en 1:1 sammenligning mellem en diesel og elektrisk drivlinje. Den hybride maskine drives af en dieselmotor, men har samtidig en hydraulisk hybrid mekanisme, der simpelt kan tilkobles af operatøren. 1:1 sammenligninger af dieseldrivlinje med og uden hybridfunktion kan dermed foretages. Den direkte sammenligning styrkes af, at den samme operatør opererer begge maskiner i alle tests, således resultatvariationer isoleres til at være en konsekvens af forskellige drivlinjer eller maskinindstillinger, og i mindre grad operatøradfærd. Volvos moderne gravemaskiner er udstyret med sensorer, der måler energiforbrug og massen af udgravet materiale. Begge parametre kan læses direkte på maskinernes instrumentpanel, og giver tilsammen et kvantitativt måltal for energiodnyttelsen. Samtlige tests er desuden kørt med HVO.

Beskrivelse af arbejdsopgaverne

Ved grave og læsse opgaven placeres maskinen på toppen af en større bunke granitskærver, som vist på billedet i FIGUR 23. Her påbegyndes en gravecyklus, som gentages i løbet af hver test i en periode på 30 minutter. Der påbegyndes en udgravning fra en position, der svarer til den viste, og operatøren fylder graveskovlen fra skråningen foran sig. Skovlen løftes derefter op i samme højde som maskinens førerhus. Samtidig drejes førerhuset 90°, hvorefter skovlen tømmes ud over skråningen. I denne position foretages en ny udgravning fra skråningen, hvor skovlen løftes op i styrehusets højde, og tømmes, når maskinen er drejet 90° tilbage til udgangsposition. Den samlede udgravede masse og energi-/brændstofforbrug noteres ved testens ophør.

For afretningsopgaven udføres en afretningsopgave, der simulerer planeringen af et underlag for et vejprojekt. I øvelsen gør maskinen brug af et rotortilt, der giver bedre førlighed med skovlen. I testen gøres der desuden brug af en læssesemaskine, der sørger for at forsyne store skovlfulde af granitskærver foran gravemaskinen. Granitskærverne planeres over et areal på 6 m x 25 m, som vist på billedet i FIGUR 24. I løbet af øvelsen planeres to lag med det ene oven på det andet. Hvert lag har en højde på 30 cm. Højden styres præcist via en indbygget højdesensor i gravemaskinen. Når det første lag er planeret over hele arealet, påbegyndes afretningen af lag nummer to. Når testen ophører, noteres massen samt tidsforbruget af planeringsarbejdet.



FIGUR 23. Grave og læsse (Eskilstuna).



FIGUR 24. Afretning (Eskilstuna).

Resultater for grave og læsse ved diesel vs. el

I sammenligningen mellem diesel- og den elektriske drivlinje i grave og læsse opgaven er produktiviteten defineret som den samlede udgravede masse, og energiudnyttelsen er defineret som forholdet imellem energi-/brændstofforbrug og produktivitet. Dieselmaskinen er opereret med og uden ECO-mode. For den elektriske maskine er der udført tests med brug af omdrejningsbegrænser, hvilket betyder, at hovedmotoren i to forskellige tests er begrænset til enten 1350 eller 1700 omdrejninger pr. min.

Som illustreret i TABEL 5 forbedres energiudnyttelsen med 6 %, når dieselmaskinen opererer i ECO-mode. Næsten samme gevinst opnås, når den elektriske maskine opererer med den lave

omdrejningsindstilling. For begge maskiner lader produktiviteten dog til at falde en smule med disse indstillinger. Produktiviteten af den elektriske maskine er på niveau med dieselmaskinen, og energiudnyttelsen forbedres samtidig med mere end 40 %. Batteriets brugbare kapacitet er 210 kWh. For den elektriske maskine vil det bidrage til en samlet produktivitet på op til ca. 1400 ton ved 2,5 timers effektiv drift.

TABEL 5. Grave og læsse diesel vs. el (Eskilstuna).

Grave og læsse								
Maskine	Drivlinje	ECO-mode	Rpm-grænse (omdr/min)	Test tid (min)	Produktivitet (Ton)	Energiudnyttelse (L/ton)	Energiudnyttelse (kWh/ton)	Note
EC220E	Diesel	On	1500	30	267,5	0,027	0,26	[1], [4]
		Off			278,4	0,029	0,28	[1], [4]
EC230 Electric	El		1350	30	265,3		0,15	[2], [4]
			1700		278,9		0,16	[2], [4]
			1350		252,5		0,16	[3], [4]

[1] Energiudnyttelsen forbedres med 6 % ved ECO-mode drift
[2] Energiudnyttelsen forbedres med 5 % ved laveste omdrejningsbegrænsning (1350 omdr/min)
[3] Test med rotortilt
[4] Med den elektriske maskine forbedres energiudnyttelsen med mere end 40 % ift. dieselmaskinen
* Der antages at 1 liter HVO har et energiindhold på 9.56 kWh.

Grave og læsse ved diesel vs. hybrid

TABEL 6 viser resultater fra grave og læsse tests for dieselmaskinen med hydraulisk hybrid funktion. Udover den hydrauliske funktion er maskinen opereret i to indstillinger. GENERAL-indstilling anvendes under normale omstændigheder, hvor maskinen opererer med anbefalede motoromdrejningstal. I HEAVY-indstilling har maskinen et større kraftoverskud, som dog oftest ikke er nødvendigt. Tabellen viser, at der opnås betydelige energibesparelser med brug af hybridfunktionen i begge indstillinger, og samtidig øges produktiviteten. Den hydrauliske hybridfunktion er særligt effektiv i grave og læsse operationer, hvor energi genvindes via gravearmens bevægelser.

TABEL 6. Grave og læsse – diesel vs. hybrid (Eskilstuna).

Grave og læsse								
Maskine	Drivlinje	Hybrid	Mode	Testtid (min)	Produktivitet (ton)	Energiudnyttelse (l/ton)	Energiudnyttelse (kWh/ton)	Note
EC350 Hybrid	Diesel	Off	General	30	358,6	0,037	0,35	[1], [3]
		Off	Heavy		353,9	0,042	0,41	[1], [3]
		On	General	30	367,7	0,034	0,33	[2], [3]
		On	Heavy		401,9	0,033	0,32	[2], [3]

[1] Energiudnyttelsen forbedres med 13 % i GENERAL-mode ift. HEAVY-mode
[2] Stort set samme energiudnyttelse i HEAVY- og GENERAL-mode
[3] Med hybrid funktion forbedres energiudnyttelsen hhv. med til 9 % og 21 % ift. GENERAL- og HEAVY-mode uden hybrid funktion
* Der antages at 1 liter HVO har et energiindhold på 9.56 kWh.

Afretningsopgave ved diesel vs. el

I TABEL 7 sammenlignes energi- og tidsforbrug for afretningen af de to lag granitskærver mellem dieselmaskinen og den elektriske maskine. For dieselmaskinen reduceres energiforbruget med 4 % ved brug af ECO-mode, og afretningen gøres med stort set samme tidsforbrug som i testen uden ECO-mode. Med den elektriske maskine er energiforbruget reduceret med mere end 40 % ift. dieselmaskinen, og endda med et reduceret tidsforbrug. Sammenholdes dette med den nuværende CO₂ intensitet i det danske elnet, som er 96 gram CO₂ pr. kWh i 2023⁴, svarer det til en CO₂ reduktion på over 80 %. I forhold til batterikapaciteten på 210 kWh, vil den effektive driftstid for afretningsarbejde være ca. 3,3 timer.

TABEL 7. Afretning – diesel vs. el (Eskilstuna).

Afretning							
Maskine	Drivlinje	ECO-mode	Rpm-grænse (omdr/min)	Testtid (min)	Energiforbrug (l)	Energiforbrug (kWh)	Note
EC220E	Diesel	Off	1500	33,0	7,36	70,3	[1], [2]
		On		33,6	7,06	67,4	[1], [2]
EC230 Electric	El		1350	29,8		31,5	[2]

[1] I ECO-mode opnås en energibesparelse på 4 %

[2] med den elektriske maskine er energiforbruget mere end halveret ift. dieseldrivlinjen

8.2 Test af Stage IV Gravemaskine i grusgrav

I en grusgrav er der foretaget PEMS-målinger på en Caterpillar CAT 325F Let Stage IV gravemaskine. På maskinen er der installeret røggaskatalysatorer (SCR og DOC), partikelfilter (DPF) og AMOX filter til rensning af mulig NH₃-slip fra SCR-katalysatoren. Maskinen kan desuden operere med og uden ECO- og POWER-mode. PEMS-udstyret blev monteret på maskinen, som vist i FIGUR 25, og blev forsynet med strøm fra maskinens 24 volt starterbatteri via en 2 kW DC/AC inverter. Under drift blev der foretaget synkroniserede real time målinger af emissioner og motordata. Dette data er indsamlet med en Dearborn OBD-protokoladapter, der blev tilsluttet via gravemaskinens diagnosestik (J1939). Målingerne blev udført i fugtigt vejr med let regn og i blød jord, og maskinen opererede på diesel og HVO. Imellem test med de to typer brændstof blev tanken tømt og det blev sikret at der ikke var blanding af de 2 typer brændstof.

Der er målt emissioner fra maskinen i kold og varm tomgangstilstand. Målinger i kold tilstand er udført som det første på en testdag, hvor maskinen har stået ude i grusgraven i slukket tilstand i mere end 15 timer natten over. De varme målinger er udført kort efter, at maskinen har arbejdet i adskillige timer.

⁴ <https://greenpowerdenmark.dk/nyheder/3-skarpe-om-energiaaret-2023>



FIGUR 25. PEMS-udstyr monteret på gravemaskine.

Beskrivelse af arbejdsopgaverne

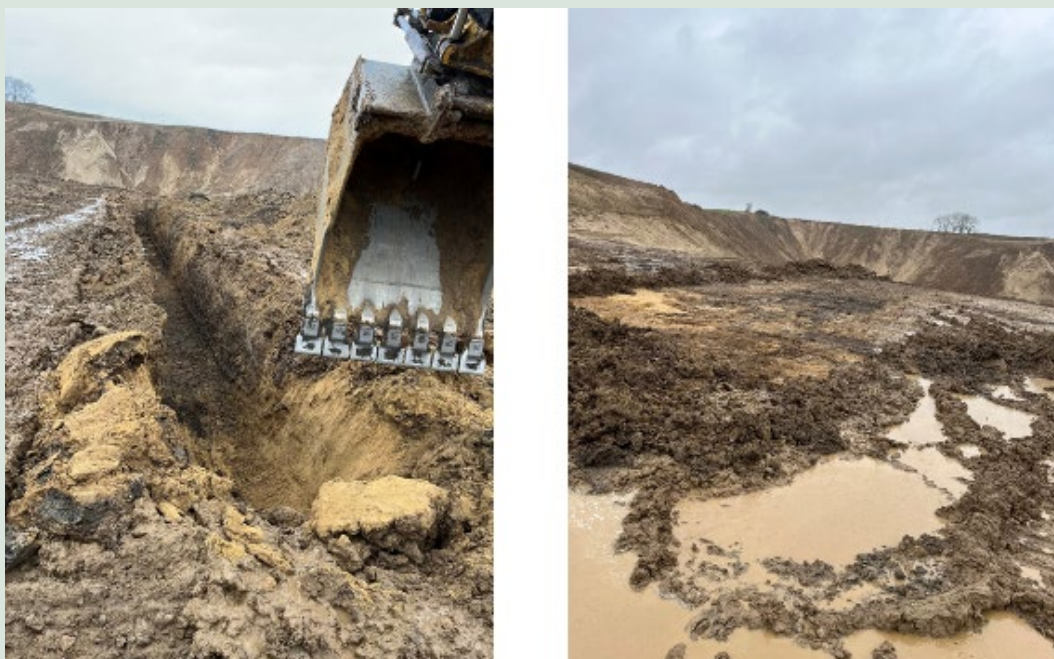
Ved grave og læsse opgaven starter maskinen en udgravning, og fylder sin graveskovl, som illustreret i FIGUR 26. Derefter løftes skovlen, og styrehuset drejes ca. 90 grader. Her tømmes skovlen i en højde af ca. fire meter for at simulere fyldning af en lastvogn. Skovlen føres derefter tilbage til udgravningen, og processen gentages. I løbet af testen foretager maskinen gradvist små og primært bakkende positionsskift. Efter en times operation var det samlede volumen af udgravningen ca. 250 m³ med en dybde på to meter, der svarer til skovlens højde, når den står lodret på sine tænder. I den efterfølgende test foretages en tilsvarende udgravning, men graveskovlen tømmes i udgravningen fra den foregående test. På den måde kan produktiviteten af de to tests sammenlignes kvalitativt.

Ved graveopgaven hvor der graves en rende starter maskinen en udgravning, og fylder sin graveskovl. Derpå løftes skovlen, og maskinens styrehus drejes få grader, og skovlen tømmes ved siden af renden. Skovlen føres tilbage til renden og processen fortsættes. I løbet af testen foretager maskinen bakkende positionsskift i takt med, at renden forlænges. Den færdige rendelængde er ca. 50 m og med en dybde på to meter, der svarer til skovlens lodrette højde, når den står på sine tænder. I en efterfølgende test graves en ny rende parallelt med den foregående rende. Ved sammenligning af rendelængderne kan produktiviteten af to tests bedømmes kvalitativt.

Ved afretningsopgaven afretter gravemaskinen jordoverfladen med en planér-skovl, som vist på billedet i FIGUR 27. Maskinen starter fra et udgangspunkt og afretter over en samlet bredde, der spænder over fire skovl-bredder på 4x1.6 m. Afretningen foregår med kontrollerede bevægelser af styrehus, kranarm og skovl med rotortilt. Når den fulde bredde er afrettet, bakker maskinen få meter til en ny position, hvor processen gentages. Længden af det afrettede areal er op til ca. 30 m. I en efterfølgende test afrettes et nyt areal i samme bredde, og produktiviteten af to tests sammenlignes kvalitativt med de færdigafrettede længder.



FIGUR 26. Grave & læsning.



FIGUR 27. Grave rende og afretning af flade.

Resultater

Ved kontinuerligt arbejde er gravemaskinens udstødningstemperatur stabil og ca. 300 °C målt ved udstødningsrørets munding. I løbet af de første få testminutter kan temperaturen dog være kraftigt stigende, hvilket betyder, at maskinens røggas-katalysatorer skifter fra inaktiv til aktiv tilstand. Resultaterne i TABEL 8, TABEL 9 og TABEL 10 dækker over den aktive periode, der indtræder ved ca. 200-250°C. TABEL 11 viser resultater fra tomgangsdrift, der tydeliggør effekten af en "kold" inaktiv katalysator.

Gravemaskinen er udstyret med et partikelfilter. Derfor er direkte sammenligninger af partikel-emissioner fra HVO- og dieselforbrænding ikke entydige. Det samme gælder for NOx og CO-emissioner, da maskinen er udstyret med SCR og DOC katalysator. Grunden hertil ligger i at filtrenes driftsforhold udgør en større afvigelse på de i forvejen lave emissioner end den målte forskel. Tabellerne viser desuden i hvilke tests, der er anvendt økonomiindstillingerne ECO- og POWER mode. Generelt er NOx- og CO-emissioner ved opgaverne grave og læsse, grave rende og afretning af flader markant lavere end de krævede EU Stage IV emissionskrav.

Ved udførelsen af de forskellige tests kan jordens vægtfylde og hårdhed variere og introducere usikkerheder ift. brændstofforbrug. Resultaterne viser dog en generel tendens til reduceret forbrug ved brug af ECO-mode. For HVO kan det højere forbrug skyldes en lavere brændværdi sammenlignet med diesel og ikke en dårligere energieffektivitet.

TABEL 8. Grave og læsse.

Gravemaskine: CAT 325F L (Stage IV) med let graveskovl

Stage IV emissions-standard: NOx = 0.4 g/kWh, CO = 5.0 g/kWh & PM = 0.025 g/kWh

Brændstof	Mode	Testtid (min)	NOx (g/kWh)	CO (g/kWh)	PM (#/kWh)	Brændstofforbrug (kg/h)	Note
Diesel	POWER	60	0,13	0,01	7.2e10	21,2	[1]
Diesel	ECO	60	0,08	0,002	8.9e10	18,0	[1]
HVO	POWER	30	n/a	0,04	2.0e11	22,1	[2]

* gram per kWh motorydelse

** antal partikler per kWh motorydelse

[1] Samlet udgravet volumen er ca. 250 m³. I ECO-mode blev der udgravet ca. 4 % mindre (10 m³) ift. POWER-mode.

[2] Denne test er udført med fokus på brændstofforbrug og emissioner ift. diesel.

TABEL 9. Grave rende.

Gravemaskine: CAT 325F L (Stage IV) med let graveskovl

Stage IV emissions-standard: NOx = 0.4 g/kWh, CO = 5.0 g/kWh & PM = 0.025 g/kWh

Brændstof	Mode	Testtid (min)	NOx (g/kWh)	CO (g/kWh)	PM (#/kWh)	Brændstofforbrug (kg/h)	Note
Diesel	POWER	35	n/a	n/a	n/a	20,8	[1]
Diesel	ECO	30	n/a	0,017	8.4e10	18,4	[1]
HVO	POWER	30	0,01	0,02	1.1e11	21,5	

* gram per kWh motorydelse

** antal partikler per kWh motorydelse

[1] Der blev udgravet ca. 5 m længere rende i ECO mode ift. POWER mode

TABEL 10. Afretning af flade.

Gravemaskine: CAT 325F L (Stage IV) med let graveskovl							
Stage IV emissions-standard: NOx = 0.4 g/kWh, CO = 5.0 g/kWh & PM = 0.025 g/kWh							
Brændstof	Mode	Testtid (min)	NOx (g/kWh)	CO (g/kWh)	PM (#/kWh)	Brændstofforbrug (kg/h)	Note
Diesel	POWER	30	0,13	0,005	9.0e10	18,9	[1]
Diesel	ECO	30	0,04	0,002	2.3e10	17,3	[1]

TABEL 11 viser emissioner fra tomgangstests med kold og varm motor. Grundet inaktive DOC- og SCR-katalysatorer er tomgangsdrift forbundet med relativt kraftige CO- og NOx-emissioner – særligt ved kold tomgang. Røggas koncentrationerne kan under tomgang overstige 500 ppm. Til sammenligning er koncentrationerne under reel drift generelt målt til at være under 10 ppm, når der ses bort fra en kort indledende periode, hvor røggastemperaturen er stigende. Undersøgelserne peger derfor på, at lokalmiljøet kan forberedes med reduceret tomgangsdrift.

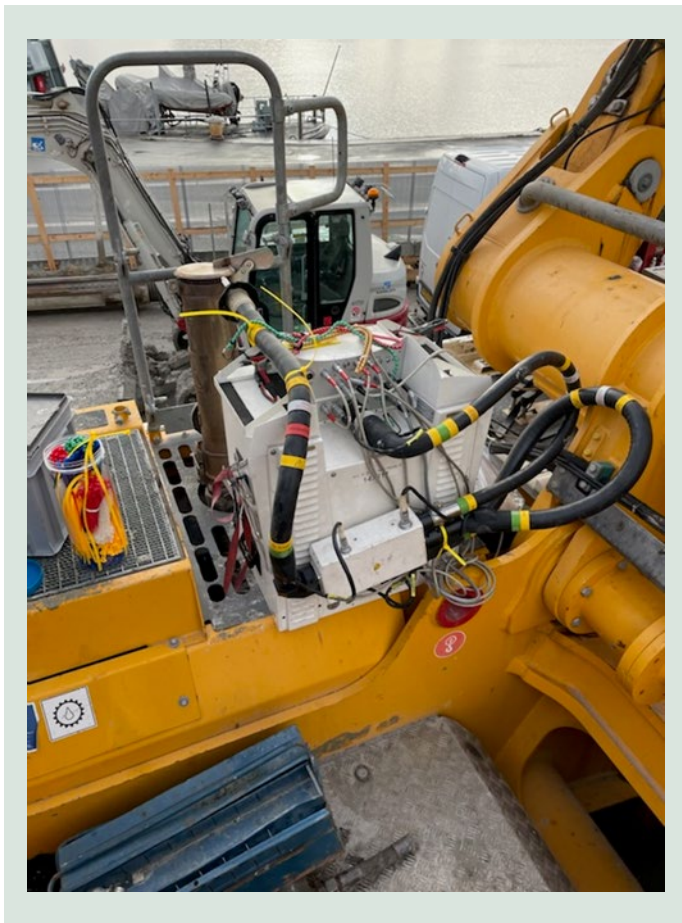
TABEL 11. Tomgang.

Gravemaskine: CAT 325F L (Stage IV) med let graveskovl						
Brændstof	Testtid (min)	NOx (g/kg)	CO (g/kg)	PM (g/kg)	Brændstofforbrug (kg/h)	Note
Diesel	18	33,6	18,4	0,015	3,3	[1]
Diesel	31	21,1	13,6	0,010	3,6	[1]
Diesel	13	8,2	0,02	0,162	2,3	[2]
HVO	8	13,2	0,06	0,127	2,5	[2]

[1] Kold tomgang
 [2] Varm tomgang
 * Emissioner er udtrykt i gram per kg brændstof

8.3 Emissionsmålinger på pæleboremaskine på byggeplads

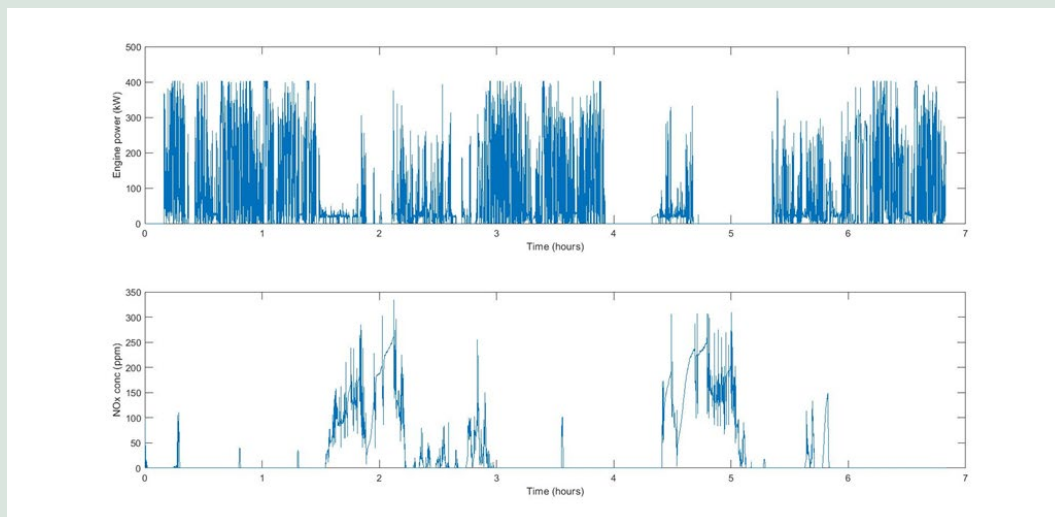
På byggepladsen er der foretaget emissionsmålinger på den pæleboremaskine, der stod for det indledende funderingsarbejde. Med pæleboremaskinen har det været muligt at foretage systematiske emissions- og forbrugsmålinger i realtid over en arbejdsdag. Maskinoperatøren har udført sit planlagte borearbejde uden forstyrrelse under målingerne. PEMS-udstyret blev monteret på pæleboremaskinen, som vist i FIGUR 28, og blev via en 2 kW DC/AC inverter forsynet med strøm fra maskinens 24 volt startbatteri. Emissionerne er målt i røggassen efter maskinens partikelfilter og NOx-katalysator kort før udstødningsrørets munding. Den ene af to testdage opererede maskinen på diesel. Den efterfølgende testdag opererede maskinen på HVO med minimum 96,7 % renhed, hvoraf resten var spor af diesel.



FIGUR 28. Montering af PEMS-udstyr på pæleboremaskine.

Resultater

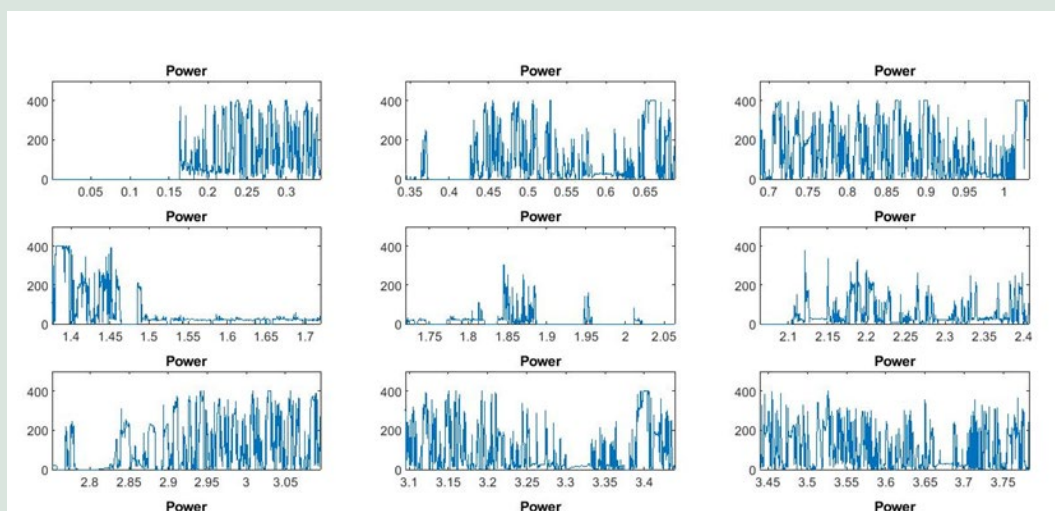
Når pæleboremaskinens borehoved drives ned igennem undergrunden, fluktuerer motorbelastningen, som illustreret i FIGUR 29. Sammenhængende perioder med lav belastning repræsenterer tomgangslast. I den tilstand driver hovedmotoren primært hydraulikpumper og kompressorer. I løbet af testdagene var maskinens CAN-bus data påvirket af signaludfald, og ses i figuren som perioder, hvor motorlasten er nul. Udfaldene resulterer i dataforskydninger, hvorfor fuldstændig synkronisering af motor- og emissionsdata ikke er mulig. Af figuren ses alligevel en tydelig sammenhæng imellem høje NO_x-koncentrationer og vedblivende lav motorlast. Figuren indikerer derfor, at maskinens SCR-katalysator effektivt renser røggassen for NO_x så længe maskinen borer, og der genereres en tilstrækkelig udstødningstemperatur. SCR-katalysatorer er normalt meget effektive ved temperaturer over 250-300°C. Derimod hæmmes rensningen ved temperaturer derunder, og forklarer de markante emissioner ved tomgangslast.



FIGUR 29. Heldagsprofil af motorbelastning (øverst) og NOx-koncentrationer (nederst) for diesel-operation.

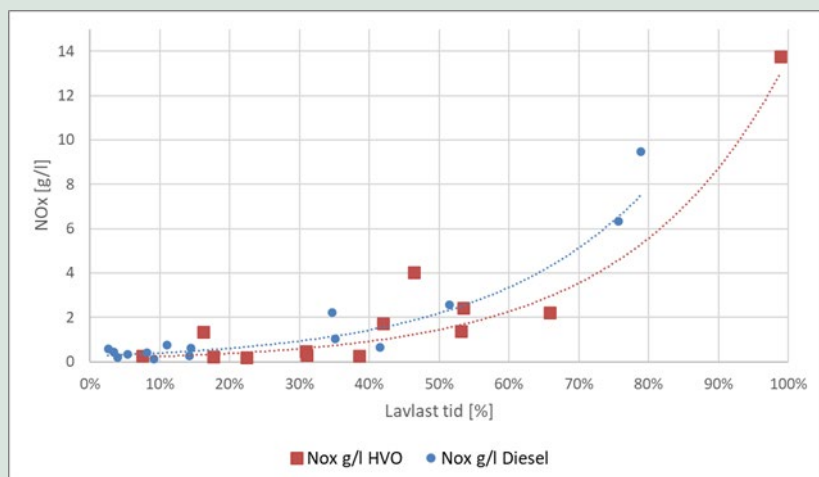
De indsamlede heldags emissions- og forbrugsdata fra HVO- og dieseloperation inddeles nu i hhv. 13 og 15 reducerede datasæt. Hvert datasæt strækker sig over 21 minutters operation, hvilket svarer til tidsforløbet af en Nonroad Transient Cycle, der bruges til EU Stage-godkendelse af motorer i entreprenørmaskiner. De reducerede datasæt kan opfattes som enkeltvis og på hinanden følgende målinger med tilfældige motorlastprofiler som illustreret i FIGUR 30. For hver måling beregnes NOx-emissionen i gram per liter brændstof af nedenstående ligning, hvor symbolet x angiver CO₂-produktionen i kilogram, der dannes ved afbrænding af én liter brændstof. For diesel og HVO er produktionen hhv. 2.65 og 2.44. [NOx] og [CO₂] udtrykker hhv. midelværdierne af NOx- og CO₂-koncentrationer for hver enkelt måling.

$$EF = \frac{[NOx] (0.9 * 30 + 46 * 0.1)}{44} * \frac{x}{1000} = \frac{[NOx] * 0.72}{[CO_2] * 1000} * x$$



FIGUR 30. Eksempler på motorlast-dataudsnit.

FIGUR 31 viser beregnede NOx-emissionsfaktor for samtlige målinger, der er plottet ift. tomgangsprocenten - altså den tidmæssige andel af de 21 minutters drift, der udgøres af tomgangslast. Selvom målingerne er foretaget efter SCR-katalysatoren, ses der alligevel en svag tendens til lavere NOx-udledning fra HVO-drift ift. diesel. Emissionsfaktoren reduceres markant når tomgangsprocenten er lav. I modsætning til målinger med høj tomgangsprocent, er spredningen samtidig lille, og på den baggrund giver det mening, at skelne imellem emissioner fra reelt borearbejde og lavlast.



FIGUR 31. NOx-emissioner for diesel- og HVO drift for pæleboremaskinen. Emissioner er udtrykt i gram per liter brændstof.

For resultaterne i TABEL 12 og TABEL 13 skelnes der mellem to driftstilfælde. Tilfælde 1 repræsenterer reelt borearbejde. Tilfælde 2 repræsenterer tomgangslast. Grænsen imellem de to tilfælde er ved 5,5 % af motorens nominelle maksimale effekt bestemt vha. af CAN-bus data. For hvert brændstof er emissionsfaktorerne i tabellerne beregnede gennemsnit af heldagsmåledata. For begge brændstoffer er emissionsfaktoren ved lavlast ca. 6 gange større end under reel drift.

TABEL 12. Emissionsfaktorer for borearbejde (Tilfælde 1).

Pæleboremaskine: BAUER BG36v (Stage IV)

Borearbejde: Kelly boring

Stage IV emissionsstandarter: NOx = 0.4 g/kwh & PM = 2.5E-2 g/kwh

Brændstof	Mode	Testtid	NOx (g/L)	NOx (g/kWh)	PN (#/L)
Diesel	EEP on	4h12m	1,1	0,34	4,79e4
HVO	EEP on	2h46m	0,7	0,24	3.19e3

TABEL 13. Emissionsfaktorer for tomgangslast (Tilfælde 2).

Pæleboremaskine: BAUER BG36v (Stage IV)

Test: Tomgangslast

Stage IV emissionsstandarter: NOx = 0.4 g/kwh & PM = 2.5E-2 g/kwh

Brændstof	Mode	Testtid	NOx (g/L)	NOx (g/kWh)	PM (#/L)
Diesel	EEP on	1h50m	7	N/A	3.9e3
HVO	EEP on	1h56m	4,3	N/A	2.6e3

8.4 Indsættelse af elektrisk entreprenørmaskine, fastcharger og datasetup

Fremtidens Grønne Byggeplads har testet en af verdens første +20 ton serieproducerede batterielektriske gravemaskiner. I december 2022 blev maskinen demonstreret på byggepladsen, hvor den i løbet af nogle uger blev opereret og testet af Aarsleff i tæt samarbejde med Volvo Entreprenørmaskiner. Demomaskinen udførte en række karakteristiske arbejdsopgaver for at sikre værdifuld viden om elektriske maskiners udviklingsmæssige niveau. Herunder føreroplevelser, ladebehov og støj til brug for kvalitative sammenligninger med en tilsvarende dieselmaskine. Maskinen, der betegnes Volvo EC230 Electric, er udstyret med en 264 kWh batteripakke med en brugbar kapacitet på 210 kWh.

Til demonstrationskampagnen blev der etableret en 300 kW lynlader på byggepladsen, der er vist i FIGUR 32. Lynladeren, der er fra Teknologisk Instituts FastChargeLab, blev tilsluttet byggestrømmen i demonstrationsperioden. Gravemaskinen er imidlertid begrænset til 150 kW opladning.



FIGUR 32. 300 kW lynlader installeret på byggepladsen.

I løbet af testkampagnen udførte gravemaskinen følgende arbejdsopgaver, der ligger til grund for kvalitative evalueringer. Det var ikke muligt at udlæse energiforbrug fra prototypens CAN-bus.

- Udgravning til kælderfundament i forskellige jordtyper (alm. jord/ler, meget fast stenfyldt jord/havbund) og i ca. 6 m dybde. Udgravet jord læsses i bunke eller direkte på lastbil.
- Udgravning til kabler. Rendebredde og dybde hhv. 1 m og 1.5 m.
- Afretning af sand.
- Diverse oprensningsopgaver i byggegrube.
- Kranarbejde (forsyning af materialer til byggegrube).

Vurdering af batterikapacitet

Batteriets kapacitet er en udfordring, da den anslåede effektive operationstid er maks. 4,5-5 timer uden opladning. Der skal helst være 6 timers operationstid fra arbejdsdagens start og til første opladning. På en 12-timers arbejdsdag vurderes maskinen at kunne være operativ i 8-9 timer, når der foretages lejlighedsvis lynopladning i pauser. I testkampagnen var operationstiden dog hæmmet af prototypens begrænsede ladeeffekt på 150 kW. Tilpasning af opladning i løbet af arbejdsdagen skal helst indtænkes på en måde, så byggeprocessen og mandskab ikke oplever forskudte pauser.

Oplevelse for fører og øvrige medarbejdere

Der opleves et mærkbart forbedret arbejdsmiljø sammenlignet med diesel drivlinje grundet mindre støj, færre vibrationer i maskinen samt lavere koncentration af emissioner. Dette gælder også for mandskabet omkring maskinen. Det fornemmes tydeligt, at maskinen udleder mindre støj end traditionelle maskiner både i kabinen og særligt til omgivelserne. Lavere maskinstøj vurderes ikke at lede til en øget risiko for mandskabet. Det er f.eks. stadig muligt at høre hydraulikken arbejde ligesom bæltene støjer, når maskinen flytter sig. Selvom moderne dieselmaskiner med røggas katalysatorer og partikelfilter allerede lugter meget mindre end ældre maskiner, opleves der generelt en bedre luftkvalitet omkring den elektriske maskine. Forbedringen er dog relativ, da det ofte er de mindre maskiner med lav højde af udstødningsrør, der udsætter mandskabet for mærkbare røggasgener.

Der er ingen forskel ved styreegenskaberne sammenlignet med en dieselmaskine. Operatøren skal dog vænnes til den elektriske drivlinje. Støj og maskinreaktioner er anderledes, og vil derfor påvirke helhedsoplevelsen. Lignende forskelle opleves allerede, dog i mindre grad, med nuværende dieselmaskiner på tværs af forskellige fabrikanten.

Støjmålinger af elektrisk og dieseldrevet gravemaskine i drift

I projektet er der udført støjmålinger på en elektrisk- og en dieseldrevet gravemaskine. Metoden er beskrevet i afsnit 6.4. Formålet er at sammenligne støjniveauer for de to drivlinjer både i førerkabinen og i ft. ekstern støj fra omgivelserne. Om muligt blev væsentlige forskelle og relevante forbedringer af den elektriske version angivet. Støjen fra den elektriske maskine er sammenlignet med den størrelsesmæssigt tilsvarende dieseldrevne Volvo EC220E, der gør brug af et identisk hydrauliksystem.

Målestedet er en relativt åben plads, og med bagvægge fra nærliggende bygninger, der virker lydreflekterende. Af den grund blev det valgt at foretage målingerne i et område tæt ud mod havnemolen, der er markeret med rødt på kortet i FIGUR 33. Et område, som dog også er tæt på en offentlig vej med let og tung trafik.



FIGUR 33. Markering af målelokationer i forbindelse med lydmålinger på gravemaskiner på byggepladsen ved Mindet på Aarhus havn.

Vejret var relativt roligt og koldt på målingstidspunktet med små sne- og sludbyger. Dog ikke mere nedbør end at målingerne kunne gennemføres. Det største problem var at opnå tilstrækkeligt stabile forhold i de relativt korte perioder, hvor der ikke var væsentlig trafikstøj fra vejen tæt ved målestedet. Vejrudsigten var ikke lovende, hvorfor der var et tidspres. Ønsker om samtidige målinger i 7,5 meter og 15 meters afstande måtte opgives af plads- og tidsmæssige grunde.

Afgrænsning

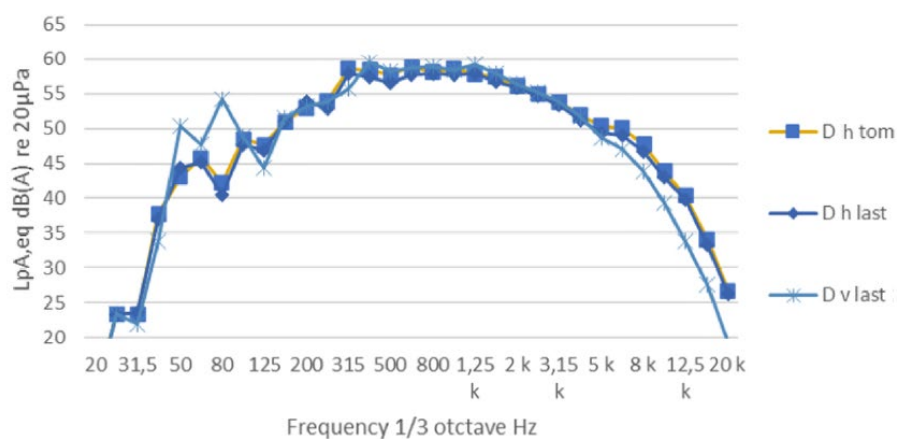
I forbindelse med demonstration blev vi af Volvo Entreprenørmaskiner bekendtgjort med at den elektriske 23 ton gravemaskine var en demo, som havde en defekt, der ledte til øget højfrekvent støj. Ved demonstrationens gennemførelse var problemet allerede løst på de øvrige demomaskiner, hvorfor det af partnerskabet er blevet besluttet at udelade disse testdata fra denne rapport.

Kabinestøj

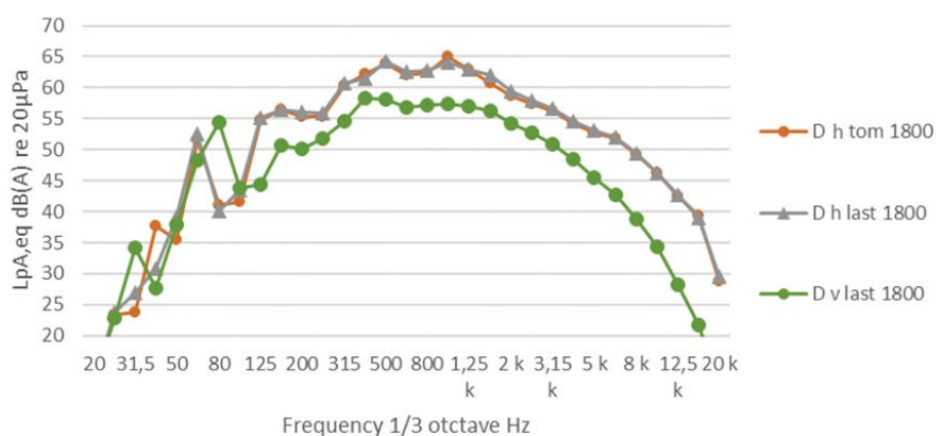
Ved udførelsen af målinger i tomgang bevæges gravearmen op og ned med tom skovl. Fra nedenstående figurer fremgår det, at der er en markant frekvensmæssig forskel på de to drivlinjer. Med dieselmotoren er grundfrekvensen omkring 31,5 Hz i frekvensbåndet og med nogle dominerende overtoner. Med den elektriske maskine er der nærmest ingen lavfrekvent støj.

Ekstern støj

Ved udførelsen af målinger med last i skovl bevæges gravearmen op og ned. Målinger viser, at der tilsyneladende er lidt mere lavfrekvent ekstern motorstøj ud for venstre side. Derudover er der ikke nævneværdig forskel på støjen ved tom eller lastet skovl ved 1400 rpm. Der er udført tilsvarende målinger med højere motoromdrejningsbegrænsning på 1800 rpm. Der synes at være samme frekvensforløb som ved 1400 rpm. Dog ses der på venstre side et uforklarligt og generelt 5 dB lavere lydniveau. Med den elektriske maskine måles der nærmest ingen lavfrekvent støj. Med last i skovlen er støjbilledet overordnet det samme som ved tomgang.



FIGUR 34. Støj målt på højre (h) og venstre (v) side af dieselmaskinen (1400 rpm) - med og uden last.



FIGUR 35. Støj målt på højre (h) og venstre (v) side af dieselmaskinen (1800 rpm) - med og uden last.

Sammenfatning og vurdering

Støjen er markant forskellig for de to typer maskiner. Dieselversionen har dominerende og relativt kraftig lavfrekvent støj, hvorimod den elektriske maskine nærmest ikke udleder lavfrekvent støj. Højfrekvente støj forventes at blive ubetydeligt for eldrevne entreprenørmaskiner. Den eksterne støj er forventeligt klart lavere for den elektriske maskine.

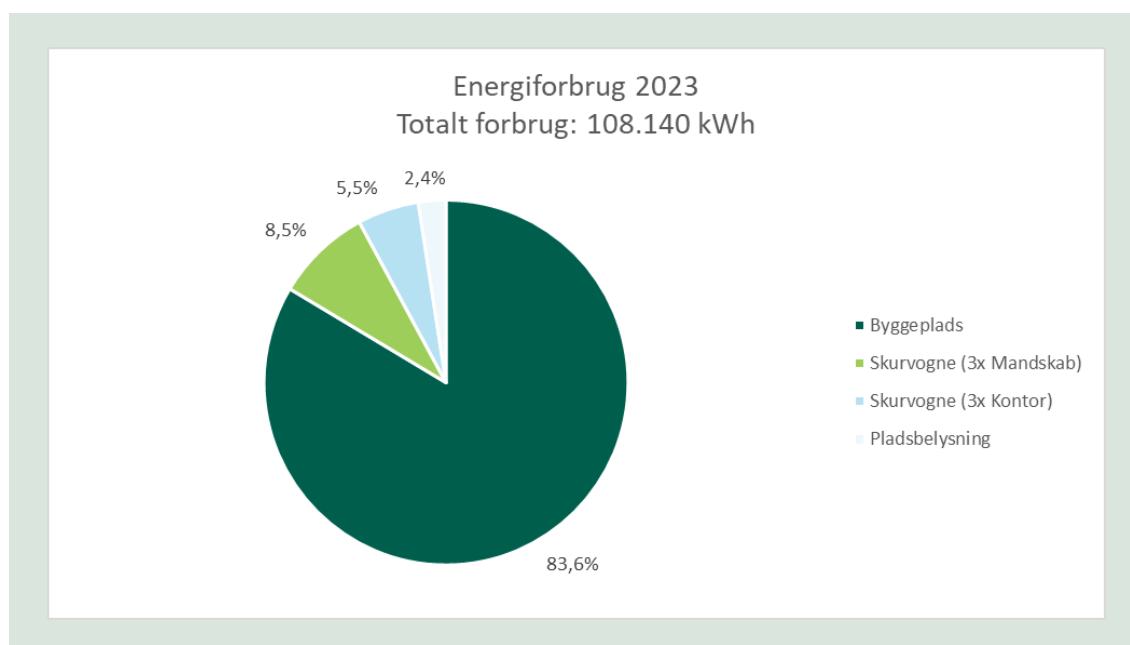
9. Demonstration af CO₂- reducerende energiforsyning

9.1 Reduktion af energiforbrug og energitab

I dette afsnit tages der udgangspunkt i det opsamlede måledata på strømforbruget på byggepladsen i 2023. Måledata anvendes til at kortlægge, hvordan strømforbruget fordeler sig mellem primært skurbyen og byggepladsen. Efterfølgende vil fokus orienteres mod skurbyen, hvor måledata på strømforbruget anvendes til at kvantificere den realiserede energieffektivisering ved udskiftning af traditionelle skurvogne med hybridmoduler.

Fordeling af energiforbrug i 2023

Med udgangspunkt i de indsamlede måledata for strømforbruget på byggepladsen kan fordelingen af det årlige strømforbrug for 2023 repræsenteres, som vist i FIGUR 36. Strømforbruget er fordelt på de installerede sensorer, og består derfor af strøm til skurbyen henholdsvis fordelt på mandskabs- og kontormoduler, pladsbelysning og selve byggestrømmen.



FIGUR 36. Fordelingen af energiforbruget på byggepladsen for 2023.

Det totale strømforbrug på byggepladsen i 2023 er 108.140 kWh, hvilket svarer til et gennemsnitligt strømforbrug for 24 husstande. Af det totale strømforbrug bruger skurbyens seks skurvogne samlet 14 %, svarende til omtrent 15.140 kWh, hvor forbruget i mandskabsmodulerne er en smule højere end kontormodulernes. Størstedelen af forbruget på 83,6 % (90.400 kWh) forbruges af byggestrømmen, som primært går til byggemaskiner og andet udstyr. Den sidste andel af strømforbruget går til belysning af byggepladsen på 2,4 % (2600 kWh).

Strømforbruget i 2023 repræsenterer et år med lavt strømforbrug, da byggeriet var i funderingsfasen. Som der kommer flere etager på byggeriet, øges strømkrævende aktiviteter, og skurbyen forventes at vokse fra seks til slutteligt tredive skurvogne totalt. Med en forøgelse af skurbyen på en faktor fem, og med en nuværende andel på 14 % af det totale strømforbrug, taler det for at undersøge tiltag, der reducerer energiforbruget på området.

Energieffektivisering af skurvogne

Som led i demonstrationen af CO₂-reducerende energiforsyning introduceres nye skurvognsmoduler fra Zeppelin Rentals kaldet hybridmoduler. De adskiller sig fra Zeppelins andre energimærkede moduler såsom Classic-line, Blue-Line og Green-Line ved at have øget fokus på både indeklima, monitorering og energiforbrug.

I energireduktionsøjemed er hybridmodulerne udstyret med en forbedret klimaskærm, varmepumpe og intelligent LED-lys med PIR-sensor til bevægelsesdetektion. Klimaskærm er et begreb, der bruges i byggebranchen, som refererer til alt det, der adskiller ude fra inde, og er derfor en indikator på isoleringsevnen. Den forbedrede klimaskærm er opnået gennem implementering af Genvex-ventilation, øget isolering og monitorering af døre og vinduer. Ventilationen er med til at styre indetemperaturen, og desto tættere klimaskærmen er, desto mere kontrolleret kan ventilationen styre temperaturen og forebygge unødvendigt varmetab. Åbning af døre og vinduer, hvor det ikke er formålstjenstligt, er en direkte brydning på klimaskærmen, og er med til at øge energiforbruget, hvorfor monitorering af disse er essentiel. Hybridmodulerne er udstyret med varmepumper, som leverer varme og køling til skurvognene. Alternativet til varmepumper er opvarmning gennem elradiatorer, som Classic-Line og Blue-Line er udstyret med. Dog er der et markant højere elforbrug forbundet med elradiatorer, hvorfor varmepumpen også er med til at reducere energiforbruget.

For at kunne undersøge den realiserede energieffektivisering på hybridmodulerne, udføres en analyse, hvor skurbyens strømforbrug sammenlignes med en skurby af Zeppelin Rental's traditionelle skurmoduler. I TABEL 14 ses skurmodulskonfigurationen af skurbyen på Mindet samt for referenceskurbyen, hvoraf det fremgår, at referenceskurbyen består af to mandskabsmoduler af typen Blue-Line og to kontormoduler af både Blue-Line og Green-Line. Referenceskurbyen er opstillet som skurbyen på Mindet med mandskabsmoduler i stueetagen og kontormoduler på 1. sal.

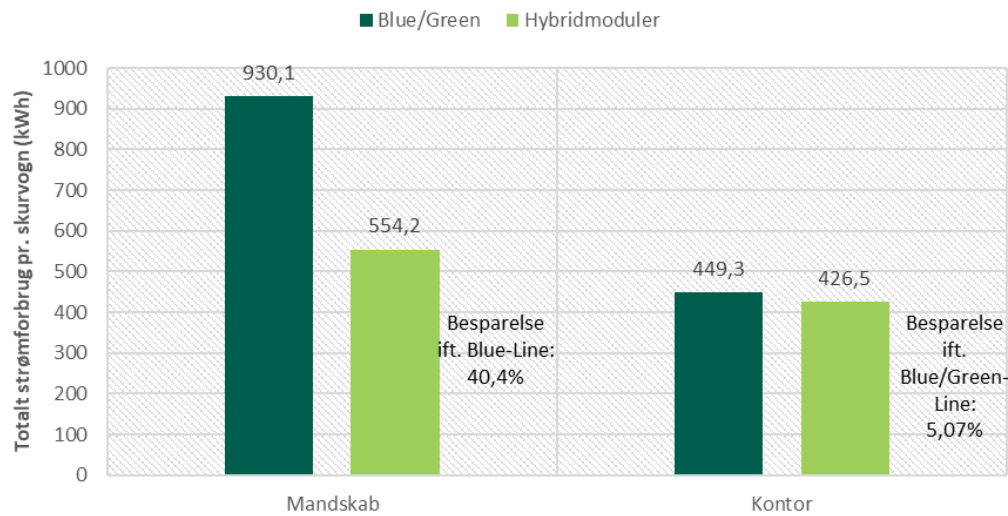
TABEL 14. Konfigurationen af skurvognsmodulerne i skurbyen på Mindet og for referenceskurbyen.

Skurby	Mandskab (stueetage)	Kontor (1. Sal)
Byggeplads	3 x hybridmoduler	3 x hybridmoduler
Referenceskurby	2 x Blue-line	1 x Blue-line, 1 x Green-line

Strømforbrugsmålingerne er foretaget i en periode, hvor skurbyerne aktivt bruges af byggepladsens personale. Det vil sige, at strømforbruget ikke kun siger noget om modulernes evne til at sænke strømforbruget, men også noget om forbrugsmønsteret. For at sikre, at der foreligger et ens sammenligningsgrundlag, verificeres dette i databehandlingen inden analysen udføres.

I FIGUR 37 ses strømforbruget normaliseret pr. skurvogn for perioden 05.03.2024 - 05.05.2024 fordelt på mandskabs- og kontormodulerne for skurbyen på byggepladsen og referenceskurbyen. For mandskabsmodulerne ses det, at der er opnået en samlet besparelse på 40 % i strømforbruget for hybridmodulerne sammenlignet med Blue-Line modulerne. Betragtes kontormodulerne, er forskellen i strømforbruget 5 %, hvilket er lavere end for mandskabsmodulerne.

Reduktion af energiforbrug på hybridmoduler



FIGUR 37. Strømforbruget normaliseret per skurvogn for perioden 05.03.2024-05.05.2024 for mand-skab- og kontormodulerne. Det anvendte måledata indeholder ikke målinger for lørdag eller søndag.

En del af forklaringen på den lave målte effekt på kontormodulerne ligger i at, at hybridmodu-lerne her sammenlignes med en blanding af både Blue-Line og Green-Line, hvor Green-Line i forvejen reducerer energiforbruget ift. Blue-Line moduler, grundet bl.a. udskiftning til varmepum-per. Dette forklarer dog ikke hele forskellen hvorfor det antages at benyttelsen af kontormodu-lerne og andre forhold har været forskellig på de to sites i den angivne periode. Betragtes skur-byen som helhed, så peger vores målinger på en overordnet reduktion i energiforbruget på 29 %.

9.2 Elektrificering og selvforsyning – solceller og batterier

Med elektrificering og selvforsyning ændres fokuset nu fra energiforbrug til energiproduktion. Som en del af projektet opsættes et solcelleanlæg til egenproduktion af vedvarende energi i skurbyen. Selvom der er blevet opsamlet måledata på strømproduktionen fra solcelleanlægget, har der været udfordringer med udfald, og den opsamlede måledata kan derfor ikke benyttes til analysearbejde. I stedet udvikles en simuleringsplatform, hvor solcelleanlæggets produktion modelleres og bruges til at analysere andelen af vedvarende energi i elforsyningen. Dertil vil simuleringsplatformen også benyttes til at analysere optimeringspotentialet for at koble syste-met med et energilager, da en fysisk opsætning af et batteri i skurbyen er uden for rammerne af dette projekt.

Simuleringsplatform

Analysen af elforsyningen på byggepladsen tager afsæt i en modelleringstilgang, som både tager afsæt i måledata og simulerede data. Modellen beregner byggepladsens energiflow for hver time, ud fra strømforbrug, den strøm, der genereres af solcelleanlægget, strømmen til og fra batteriet og strømmen til og fra distributionsnettet.

Strømforbruget er baseret på det målte akkumulerede energiforbrug i kWh. Dette interpoleres, hvilket vil sige, at værdier mellem kendte datapunkter estimeres, hvorefter det konverteres til en tidsserie med timeværdier i kW for 2023.

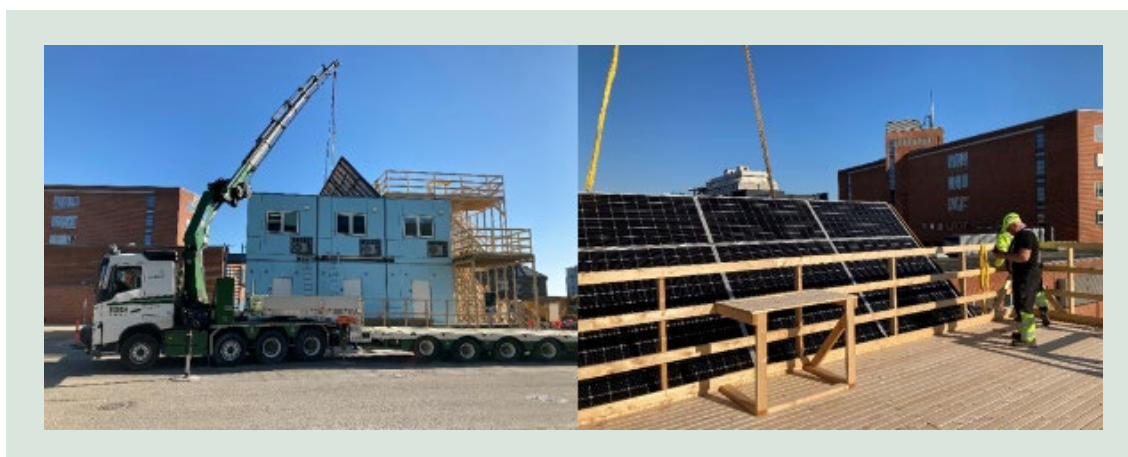
Strømproduktionen fra solcelleanlægget modelleres i NRELs modelleringsværktøj SAM, der er baseret på vejrdata for Aarhus 2023 fra Copernicus Climate Data Store og databladsspecifikationerne for solcelleanlægget og dets opsætning. Måledata fra Zeppelin Rental anvendes til at verificere den modellerede tidsserie og skalere denne med tab for at opnå korrekt repræsentation af det faktiske anlæg.

Simuleringsplatformen kan udvides til at inkludere et energilager. Dette gøres i SAM, hvor der konstrueres et virtuelt system med strømforbrug og strømproduktion, hvortil energilageret kan tilføjes og modelleres med de prædefinerede specifikationer for et litium-ionbatteri. Under simuleringen er det muligt at justere på batteriets energi kapacitet, inverterens effekt kapacitet og styringsmetoden.

Energiproduktion af grøn strøm fra solceller

Som del af den smarte energiinfrastruktur er skurbyen udstyret med et solcelleanlæg, der skal bidrage med lokal egenproduktion. Solcelleanlægget er udviklet af Zeppelin Rental, som også leverer skurvognene. Solcelleanlægget kaldes SunCap, og består af 12 AIONRISE 395 Wp moduler og en Fronius Symo inverter med en effektydelse på 4500 W.

SunCap er udviklet med henblik på at have et modulært set up til skurvognsbyer. Med dens overfladeareal på 23,79 m² passer den nøjagtig på taget af én skurvogn. Solcelleanlægget, som er vist i FIGUR 38, leverer strøm til skurbyen, hvor resten af strømmen leveres gennem nettilslutning.



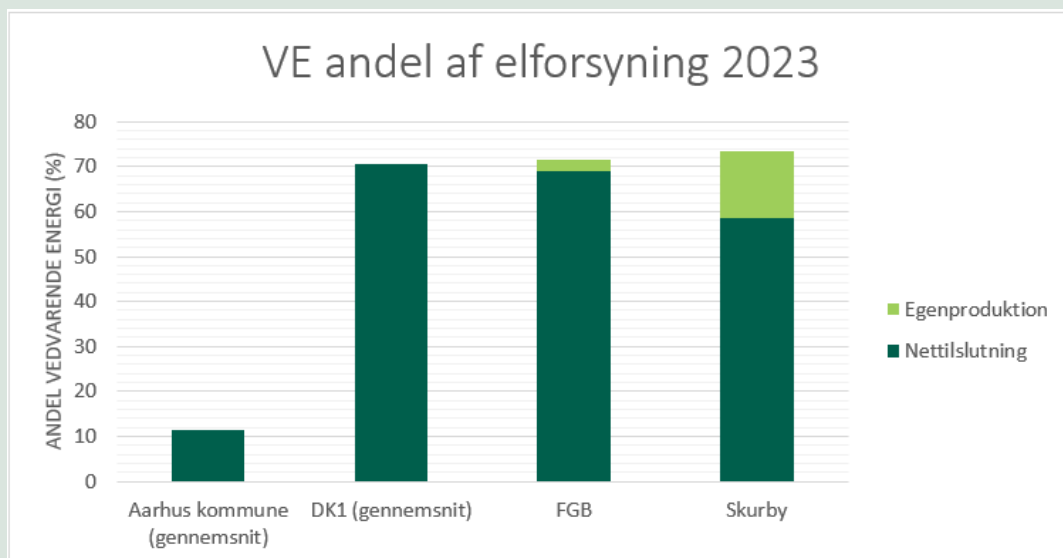
FIGUR 38. Skurbyen på byggepladsen ved Mindet 6, hvor solcelleanlægget SunCap er i gang med at blive installeret.

Med simuleringsplatformen er det muligt at simulere solcelleanlæggets strømproduktion i 2023 samt strømmen, der leveres gennem nettilslutningen. Baseret på dette kan andelen af vedvarende energi i elforsyningen på byggepladsen beregnes, hvor al egenproduktion betragtes som vedvarende energi, og andelen af vedvarende energi i distributionsnettet er baseret på data fra Energinet⁵.

I FIGUR 39 ses andelen af vedvarende energi for forskellige scenarier. For en lokal betragtning af Aarhus kommune udgør vedvarende energi i gennemsnit 11,5% af elforsyningen. Til sammenligning er andelen af vedvarende energi i DK1's elforsyning 70,7%, når import og eksport medregnes og antages at have en vedvarende energi-andel på 0% (hvilket er en konservativ antagelse).

⁵ <https://www.energidataservice.dk/tso-electricity/ReCoverageMunicipality>

Sammenholdes elproduktionen, import, eksport og forbrug time for time i 2023, kan det ses, at egenproduktion fra solceller dækker 15% af skurbyens forbrug og 2,5% af hele byggepladsens forbrug. Når forbruget medtages, bliver det tydeligt, at nettilslutningen bidrager med en lavere andel af vedvarende energi end gennemsnittet. Dette skyldes, at forbruget ofte ligger i perioder med lavere produktion fra vedvarende energikilder.

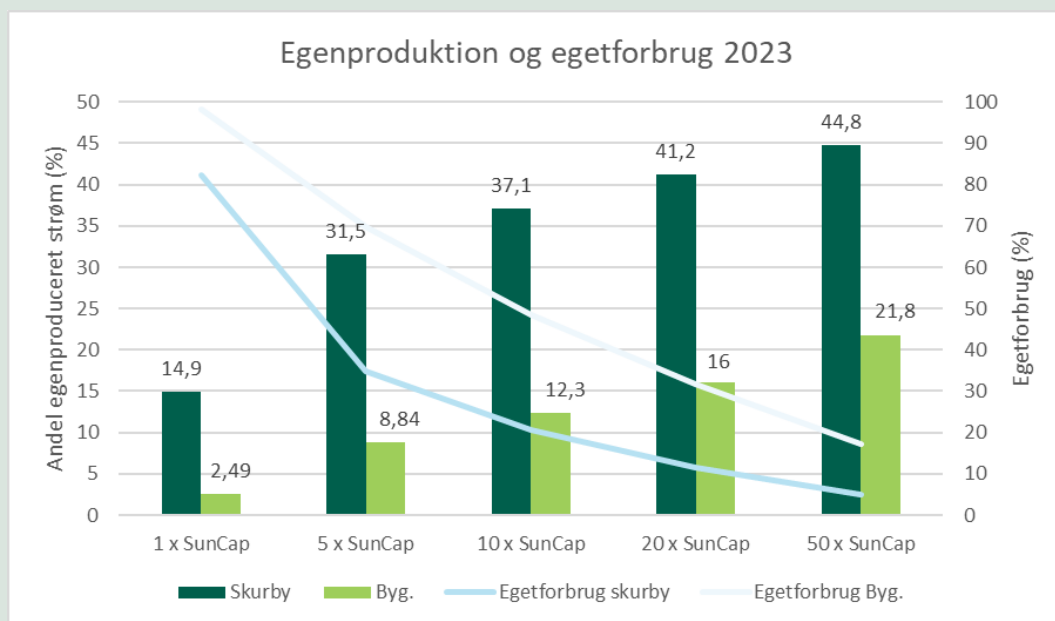


FIGUR 39. Andelen af vedvarende energi (VE) i elforsyningen for Aarhus kommune, DK1, hele byggepladsen og skurbyen isoleret set. Andelen af vedvarende energi er baseret på egenproduktionen fra solcelleanlægget og andelen fra nettilslutningen. Andelen af vedvarende energi i nettilslutningen er baseret på data fra Energinet.

I forlængelse heraf er det vigtigt at bemærke, at andelen af vedvarende energi i elforsyningen er direkte afhængig af den geografiske placering. Udvides betragtningen til hele Danmark, dækkede vedvarende energi over 80 % af det danske elforbrug i 2022 ifølge Energistyrelsen⁶. Egenproduktion på byggepladsen skal derfor ses som en måde at sikre vedvarende energi i elforsyningen.

Med øget elektrificering og et stigende strømforbrug for en byggeplads i forandring, sættes der højere krav til elforsyningen. Der er begrænsninger forbundet med at øge egenproduktionen fra solceller, da en byggeplads kun har en begrænset mængde plads. Dog er det alligevel interessant at undersøge potentialet i sådan en udvidelse. I FIGUR 40 ses resultaterne fra simuleringsplatformen for en opskalering af solcelleanlægget SunCap i forhold til egenproduktion og egetforbrug. Egenproduktionen beskriver den andel af strømforbruget, som er dækket af solcelleanlægget. Egetforbruget beskriver andelen af strømproduktionen fra solcelleanlægget, som bliver brugt, hvor den resterende del sendes tilbage til nettet. Figuren viser, at søjlerne konvergerer mod et maksimum, hvilket skyldes, at det resterende forbrug befinder sig, hvor solen ikke skinner. En udvidelse med solcelleanlæg vil derfor maksimalt kunne dække omtrent 45 % af skurbyens eget forbrug, og mindre for hele byggepladsens forbrug.

⁶ <https://ens.dk/presse/mere-end-80-procent-af-stroemmen-var-groen-i-2022>



FIGUR 40. Egenproduktionen og egetforbruget for en opskalering af solcelleanlægget SunCap sammen med skurbyens forbrug eller hele byggepladsens forbrug (Byg.). På venstre y-akse ses andelen af egenproduceret strøm i % afspejlet af søjlediagrammet. På den højre y-akse ses egetforbruget i % afspejlet af linjediagrammet.

På figurens sekundære y-akse vises egetforbruget, som beskriver andelen af solcelleproduktionen, der forbruges af skurbyen eller byggepladsen. Derfor er det også et mål for den tilgængelige produktion, der potentielt kan lagres. Egetforbruget for én enkelt SunCap med hele byggepladsens forbrug er tæt på 100 %, hvilket betyder, at der ikke er overskydende strøm, som kan lagres i et batteri. Hvis forbruget kobles med 5, 10 eller flere SunCap anlæg, falder egetforbruget og potentialet for koblingen med et energilager stiger.

Optimeringspotentiale ved smart-energilagring med batterier

Med koblingen af et batteri følger flere optimeringspotentialer, som er relevante for byggebranchen. Afhængigt af måden batteriet drives på, kan det både være med til at øge egenproduktionen, udglatte spidsbelastninger samt overordnet reducere den nødvendige nettilslutning. Udglatning af spidsbelastninger bliver endnu mere relevant, hvis man kigger i retning af elektrificering af diverse byggemaskiner, da disse kan bidrage med kortvarige høje belastninger. Derudover vil en udglatning af spidsbelastninger også medvirke til en mere stabil elforsyning. Fra et økonomisk synspunkt vil en reduktion af nettilslutning altid være fordelagtig, da det reducerer de relaterede omkostninger hertil.

Optimeringspotentialet for koblingen til et energilager undersøges og analyseres med simuleringsplatformen. Der udføres en række simuleringer for to forskellige måder at drive energilageret på sammen med egenproduktion fra solcelleanlægget og byggepladsens forbrug:

1. Et studie, hvor energilageret styres med fokus på reduktion af spidsbelastninger.
2. Et studie, hvor energilageret styres med fokus på at maksimere egetforbruget.

Simuleringerne udføres for forskellige kombinationer af SunCap anlæg fra 1-50 styk og forskellige inverter- og batterikapaciteter i området 4,5-300 kW/kWh. Baseret på simuleringsresultaterne er der mange måder at koble solcelleanlægget med et energilager afhængigt af hvilke faktorer, der ønskes prioriteret. I TABEL 15 er simuleringsresultaterne for scenariet med 10x

SunCap anlæg og et 75 kWh/kW batteri vist, som et eksempel på en optimal kombination uden at tage økonomiske aspekter i betragtning. Simuleringsresultaterne sammenlignes ud fra fire parametre:

1. Egenproduktionen
2. Nødvendige nettilslutning
3. Opnåede spidsbelastningsreduktion
4. Egetforbruget.

Af resultaterne ses det, at energilageret med styring, der prioriterer spidsbelastningsreduktion, opnår en forbedring på alle fire parametre ift. baseline uden et energilager, hvor styringen, der prioriterer egetforbruget, ikke opnår en reduktion af nettilslutning, men opnår derimod en relativ større gevinst på parametrene egenproduktion, spidsbelastningsreduktion og egetforbrug.

TABEL 15. Simuleringsresultaterne for et energisystem med 10 styk SunCap anlæg kombineret med et energilager med 75 kWh/kW energi/effekt kapacitet for de to styringer: (1) styring efter reduktion af spidsbelastninger og (2) styring efter maksimering af egetforbrug.

	Uden energilager	Energilager (1)	Energilager (2)
Egenproduktion	12 %	14 %	19 %
Nettilslutning	110 kW	87 kW	110 kW
Spidsbelastningsreduktion	0 %	16 %	39 %
Egetforbrug	48 %	56 %	74 %

TABEL 15 præsenterer et eksempel på en kobling af systemet med et energilager, men det opnåelige potentiale vil være afhængig af kombinationen af antal solcelleanlæg og batterikapacitet. Derudover vil det være op til den endelige energy management strategi at beslutte, hvordan egenproduktion, nettilslutning, spidsbelastningsreduktion og egetforbrug skal prioriteres.

9.3 Indeklima i skurvogne

Som en del af projektet, er der udviklet en ny type skurvogn til byggepladsen, hvor der er fokus på et optimeret energiforbrug og indeklima. I denne del af projektet har vi undersøgt indeklimaet i skurvogdenes kontordel, hvor personalet arbejder i længere perioder ad gangen. Vi har brugt koncentrationen af CO₂ i luften som indikator for indeklimaet. CO₂ er en god indikator for luftkvaliteten, og kan vise, om ventilationen er tilstrækkelig i forhold til antallet af personer, der opholder sig i lokalet. Dårlig luftkvalitet kan f.eks. påvirke personers indlæringssevne, søvnkvalitet og produktivitet. Overskrider grænseværdierne bør man kigge på, hvordan luftkvaliteten kan forbedres.

For byggebranchen er det vigtigt at have øget fokus på indeklimaet, da dårligt indeklima påvirker produktiviteten negativt. Branchens medarbejdere kan også arbejde i det man kan betegne som "midlertidige" lokaler, hvor det omkringliggende miljø kan være både støvende og støjende, hvilket har en direkte indvirkning på netop indlæringssevne, søvnkvalitet og produktivitet.

Intentionen med dette forsøg var fra projektets start at undersøge og sammenligne forskellige typer af ventilationsstyring med henblik på at sikre et godt indeklima i skurvogne. Udstyret der blev benyttet i testen var ikke tidligere blevet anvendt i sammenhæng med skurvogne. Det skal desuden bemærkes, at den menneskelige adfærd ikke har været en del af projektet, da det var teknologien, der var fokus på. Undervejs i projektet er der blevet belyst flere aspekter og problemstillinger, hvilket har resulteret i mange læringer. Disse vil blive uddybet i de følgende afsnit.

Forsøgsopsætning

Skurvognsmodul består af seks skurvogne fordelt på to etager. Opvarmning og køling sker via tre luft til luft varmepumper. Ventilation sker via facademonterede mikroventilationer, som sikrer konstant tilførsel af frisk luft og reducerer energiforbruget ved at minimere varmetab. I stueplan findes en mandskabsvogn med omklædning og frokoststue. 1. sal indeholder 10 kontorpladser, mødelokale, kopirum og toiletter. På 1. sal er der installeret fem fresh flow ventilatorer, som også sikrer en kontinuerlig strøm af frisk luft ved hjælp af mekanisk ventilation. Dertil er der mekanisk udsugning på toiletterne.

To sensorsystemer til CO₂ måling var til stede i skurvognen: Én fra KM ConneX og én AirNode fra DevLabs. Sidstnævnte sensor er den samme type som den der blev anvendt i det udendørs sensornetværk ifm. byggepladsmonitorering. Sensorerne var alle monteret over døren mellem det ene kontorrum og tekøkkenet. Desuden har der været koblet CO₂-senser direkte på ventilationssystemet. Ventilationen har været styret på tre forskellige måder i løbet af projektet:

- Ingen styring – start december 2022 til midt februar 2023
- Timer styring – midt februar 2023 til midt oktober 2023
- Sensor styring – midt oktober 2023 til januar 2024

Hardware – erfaringer, problemstillinger og anbefalinger

På baggrund af installation og opsætning af ventilationsstyring er det i projektet blevet erfaret, at det er vigtigt at systemet er simpelt at installere og anvende, hvis det skal fungere i dagligdagen på byggepladsen. Dertil skal det også være modulært da skurvogne anvendes som individuelle enheder. For brugerne af skurvognene skal det gerne være en turn-key løsning, hvor det er vigtigt at ventilationen let kan øges eller forlænges af den enkelte medarbejder med én simpel betjening. Hvis ventilationen skal styres efter CO₂ og/eller temperatur, skal disse funktioner være installeret og opsat fra start, grænseværdierne skal være fast defineret, og de enkelte enheder i skurvognen skal tale sammen.

I valg af sensorsystem har forsøget vist, at det er vigtigt at være opmærksom på nøjagtighed og pålidelighed af sensorsystemet. Hvis en sensor viser uregelmæssige eller unaturlige niveauer, kan det tyde på driftsproblemer. Denne vurdering kræver uddannet personale med viden om forventede niveauer.

Indeklima – erfaringer, problemstillinger og anbefalinger

Ved analysen af de målte CO₂ -niveauer blev der ikke fundet signifikante forskelle mellem perioderne, hvor forskellige ventilationsstyringer blev testet. Denne mangel på forskel indikerer, at ukendte faktorer kan have påvirket resultaterne, da det forventedes, at der ville være forskel på CO₂ -niveauerne i perioden uden styring og perioderne med ventilationsstyring.

Under besigtigelse af skurvognene blev det observeret, at ventilationen ikke var aktiv på tidspunkter, hvor den burde have været det. Denne uoverensstemmelse udfordrer validiteten af det opsamlede data. Hvis ventilationssystemet ikke har været tændt, når det skulle, kan det forklare fraværet af signifikante forskelle i CO₂ -niveauerne mellem de forskellige styringsperioder. En vigtig læring til fremtidige undersøgelser er derfor at inkludere data om ventilationssystemets status eller det reelle luftskifte sammen med CO₂ -niveauet.

En anden væsentlig faktor, der påvirker indeklimaet, men som ikke blev undersøgt i dette forsøg, er adfærden fra medarbejdere i skurvognene. Hvis en medarbejder vælger at åbne døre og vinduer for at regulere temperaturen eller luftkvaliteten manuelt i stedet for at bruge den planlagte ventilationsstyring, giver det en udfordring i forhold til at koble CO₂-niveauerne med styringen. Denne naturlige og menneskelige adfærd blev ikke taget i betragtning under forsøget, hvilket udgør en udfordring for konklusionerne.

Erfaringerne fra forsøget viser, at der er udfordringer med at opretholde god luftkvalitet i skurvogne, og at mange faktorer spiller ind for at sikre et godt indeklima. Fremadrettet anbefales det at fokusere på ventilationssystemet, herunder både kapaciteten og styringsmulighederne. Da skurbyerne ofte er placeret tæt på byggepladser og dermed i forurenede miljøer, kan det være nødvendigt med en overkapacitet i ventilationssystemet. For styringsmulighederne er det vigtigt, at eventuelle automatiserede systemer fungerer i samspil med medarbejdernes almindelige adfærd. En måde at forbedre adfærden kunne være gennem uddannelse og synlig monitorering af luftkvalitet for at øge den enkelte medarbejders evne og motivation til aktivt at bidrage til forbedret luftkvalitet. Dette vil øge sandsynligheden for, at systemerne fungerer effektivt og opretholder et godt indeklima.

Konklusioner og anbefalinger

Samlet set kræver sikring af et godt indeklima i skurvogne en større indsats, herunder en øget fokus på tilstrækkelig ventilationskapacitet, overvågning af ventilationssystemets status, anvendelse af sensorer med hensigtsmæssig nøjagtighed, implementering af modulær og brugervenlig styring samt en øget inddragelse af medarbejderne. Dette vil understøtte et bedre indeklima i skurvogne med værktøjer som muliggør, at uhensigtsmæssigheder kan håndteres effektivt.

De tre forskellige styringer gav ikke signifikante forskelle, men vi er i projektet blevet klogere på, hvad der kræves af et styrings- og sensorsystem til skurvogne. Den testede styringdel har vist sig ikke at være egnet til skurvogne, da den ikke fra start var designet til at være let at installere, robust og brugervenlig i miljøet på en byggeplads. Det kan derfor anbefales at se ind i et ventilationssystem med styring, der er dedikeret til brug i skurvogne. Systemet bør være modulært, let at installere og intuitivt at anvende for personalet. Desuden bør der indrettes en automatisk kontrolmekanisme, der kan sikre at både ventilation og sensorer kører, som de skal.

9.4 Datadrevet værdiskabelse og energy management

Datadrevet værdiskabelse skal her forstås som en proces eller handling, der ændres fra en ofte manuel handling baseret på mavefornemmelse eller erfaring fra den pågældende medarbejder, til en mere digitaliseret proces, hvor arbejderen guides via data. Data kan her forstås som numeriske eller grafiske indikatorer på et online dashboard, men kan også være LED-indikatorer, lyde m.m.

En problemstilling på byggepladser er, at sammenkoblingen af mange byggestrømtavler - og dertilhørende elektriskværktøj - ofte kan give anledning til sprængte sikringer i byggetavlerne pga. for stort strømtræk igennem forgreningerne under tavlen. Der bliver derfor brugt forholdsvis meget unødigt tid fra byggepladsens elektrikere på at skifte sikringer og omfordele sammenkoblingen mellem byggestrømtavler og udstyr.

I projektet er der ikke implementeret en løsning til at afhjælpe problemet. Derimod er der frembragt flere løsningsscenarier, som er blevet behandlet på idé-niveau. Løsningerne peger imod et forsøg på at "nudge" de arbejdere, som bruger byggetavlerne dagligt, til at ændre deres adfærd. De skal derudover have øget deres bevidsthed om, hvornår de er tæt på at forårsage et for stort strømtræk på en tavle.

En løsning kunne basere sig på at farvekode de forskellige udtag i en byggetavle, således bestemt udstyr skal sættes i bestemte grupper. Hvis gruppen er optaget i én byggetavle, skal man finde en ny for at tilslutte sit udstyr. Ulempen ved løsningen er, at man kan opleve at stå foran en byggetavle, hvor man skal tilslutte sit udstyr i de grønne stik, som er optaget. Derimod er der helt frit i de røde, blå og gule stik, og derfor vil man fristes til at tilslutte sit udstyr i en af de andre stik for at komme hurtigt videre med sit reelle arbejde.

En mere teknisk og datadrevet løsning ville være at oprette et IoT-netværk for byggetavlerne. På den måde kan byggetavlerne "kommunikere" med hinanden, og give hinanden besked om,

hvor tæt de hver især er på for højt strømtræk. Løsningen ville sætte krav til, at alle byggetavler får indbygget en måler med en microchip, som muliggør "smart" monitorering af hver enkelt byggetavle, og kan give besked via et display eller LED'er om, hvorvidt mere udstyr eller flere undertavler bør tilsluttes. Kommunikationen imellem tavlerne kan enten foregå med "power line kommunikation" eller vha. trådløs mesh-kommunikation.

Ligeledes er der flere optimeringspotentialer for sikringen af byggestrømmen, når der snakkes om et smart-energisystem. Ordet "smart" dækker over et energy management system, som overvåger, kontrollerer og optimerer energiforbruget efter selvvalgte og prioriterede strategier. Indeholder energisystemet et energilager kan energy management systemet udnytte lagringen af energi til reducere af spidsbelastninger, som kan være medhjælpende til at sikre spændingskvaliteten og minimere risikoen for kortslutninger.

Fra et økonomisk synspunkt vil et smart energilager kunne anvendes til at reducere omkostninger forbundet med tilslutningsafgifter og elprisudgifter. Den nødvendige nettilslutning kan reduceres ved at udnytte lagret energi, hvor maksimalbelastningen er højest, og dermed medvirke til lavere tilslutningsafgifter. Derudover kan energilageret benyttes til energi arbitrage, hvor strøm købes, når elprisen er lav og sælges, når elprisen er høj. For en byggeplads ligger det meste af forbruget i højlasten mellem kl. 6 og 17, hvorfor der forventes at være et optimeringspotentiale for energilageret, da strømmen generelt er billigst om natten, samt når vinden blæser eller solen skinner.

Optimeret drift af byggestrøm

Anbefalingerne om datadrevet værdiskabelse gav anledning til et fysisk forsøg med henblik på at undersøge funktionaliteten af en løsning i praksis. En byggeplads er meget dynamisk af natur, da den hele tiden tilpasses udviklingen af byggeriet. Dette gælder også byggepladsens strømforsyningsnet. Jo flere strømfbrugere der skal tilkobles, desto flere forgreninger kræves der under hovedtavlen, hvilket kan give udfordringer med uforudsete nedbrud. Nedbrud eller kortslutninger på byggetavler ses i måledata som et forbrug på nul, men udfordringen ligger i at skelne mellem et potentielt nedbrud i byggetavlen, og at strømfbrugeren blot er slukket eller fjernet, da begge situationer viser et effektforbrug på 0 W. Byggetavler er ikke udstyret med indikatorer på belastningsgraden, hvilket kræver et større overblik af brugeren for at undgå overbelastning.

En digitalisering af byggestrømmen samt en smart-elmåler viser sig at være en pragmatisk og omkostningseffektiv løsning til disse udfordringer. Hos Teknologisk Institut er der udviklet en smart-elmåler med formålet at optimere driften af byggestrømmen. Smart-elmåleren er en Plug & Play løsning med et batteri, der aktiveres ved nedbrud og muliggør fortsat rapportering samt indikering af nedbrud gennem batteriets lade/aflade status. Elmåleren er udstyret med et display, der viser det aktuelle og maksimale effektforbrug, hvilket hjælper brugeren med at kende hver enkelt undertavles belastningsgrad. Dermed nedbringes antallet af unødige nedbrud.

Den udviklede smart-elmåler består af en Carlo Gavazzi EM540 elmåler og en M5stack med et batterimodul og en IoT base. M5stack-delene muliggør visualisering af aktuelle måledata via et display samt lagring af data i en database på Thingier.io, som kan tilgås og analyseres. Batteriet leverer strøm ved kortslutning, således måleren fortsat kan lagre data, og skelner mellem nedbrud og fjernelse af strømfbrugere alene ud fra batteriets opladningsstatus. Smart-elmåleren kan tilkobles tavlerne via CEE-stik og leveres som en Plug & Play løsning, der kræver minimal indsats at implementere på en byggeplads. Til effektiv implementering kræves en certificeret elektriker, smart-elmåler og identificering af relevant placering via CEE-stik. Ved tilkobling dannes et signal til databasen, og datalagring påbegyndes automatisk. Ønskes det at tilgå det opsamlede data ud over det, som vises på displayet i realtid, kan disse downloades fra databasen på Thingier.io.

Case: Skurvognsby

Ved at koble drivhusgasemissionerne forbundet med elproduktionen er det muligt at evaluere den opnåede CO₂ reduktion i energisystemet. Til dette beregnes emissionsfaktorerne, som beskriver udledningen af drivhusgasser forbundet med produktionen af én kWh. Emissionsfaktorerne beregnes for skurbyen med hybridmoduler, hvor elforbruget dækkes af egenproduceret strøm fra solcelleanlægget samt nettilslutningen og sammenlignes med referencebyggepladsen med Blue-Line og Green-Line skurvognsmoduler, som udelukkende dækker elforbruget gennem nettilslutningen.

Baseret på en LCA-rapport for solcelleanlæg SunCap udledes der 60 g CO₂ ækv. /kWh, hvis det antages at SunCap har en levetid på 25 år. CO₂-emissionerne forbundet med elproduktionen fra nettet beregnes med afsæt i historiske data fra Energinet for emissioner i TSO-nettet⁷ med 125 % metoden for kombineret produktion af strøm fra kraftvarmeværk, samt andelen af vedvarende energi i DSO-nettet på kommunalt niveau⁸.

De beregnede emissionsfaktorerne er vist i TABEL 16 for CO₂-ækvivalenten, hvor drivhusgasudledningerne fra CO₂, CH₄, og N₂O omregnes ved brug af deres Global Warming Potential (GWP), som henholdsvis har værdierne 1, 28 og 265 ifølge IPCC AR5.

TABEL 16. Emissionsfaktoren forbundet med strømforbruget for skurbyen på Mindet og referenceskurbyen, samt det gennemsnitlige forbrug pr. skurvogn for måleperioden 05.03.2024 til 05.05-2024. Emissionsfaktoren er en gennemsnitlig værdi for hele skurbyen.

Skurby	Emissionsfaktor (g/kWh)	Forbrug pr. skurvogn (kWh)
Referenceskurby	3068	690
Skurby, Mindet 6	2671	490

Af tabellen fremgår det, at emissionsfaktoren for skurbyen på byggepladsen er lavere end den for referenceskurbyen som følge af den lokale egenproduktion af strøm fra solcelleanlægget. Ganges emissionsfaktorerne sammen med det gennemsnitlige skurvognsforbrug i måleperioden fås effekten af energieffektiviseringen af skurmodulerne også med i CO₂-regnskabet. Dermed opnås en samlet reduktion på 38 % i CO₂-ækvivalente emissioner for skurbyen på byggepladsen som følge af både energieffektivisering og lokal egenproduktion af grøn strøm.

⁷ <https://www.energidataservice.dk/tso-electricity/DeclarationTransmissionEmission>

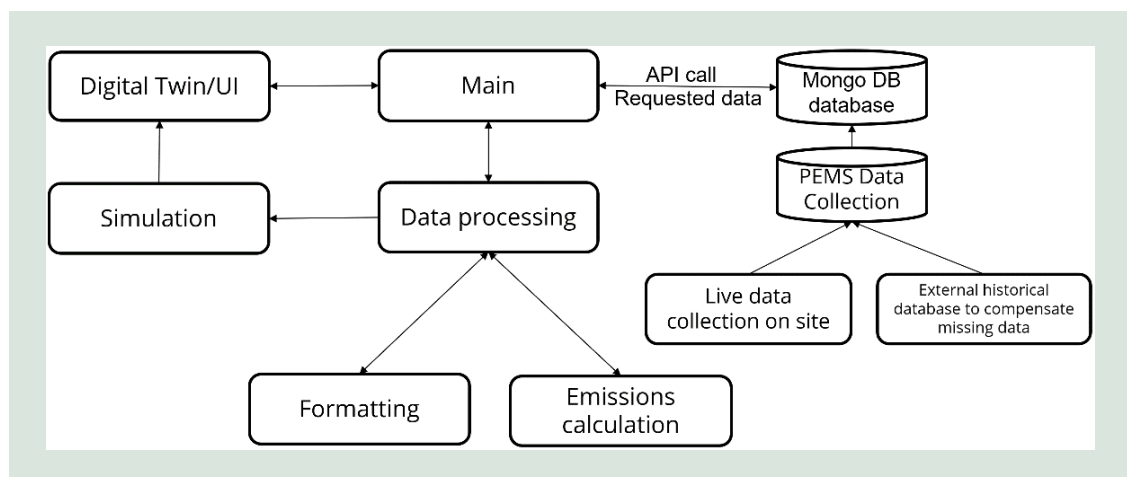
⁸ <https://www.energidataservice.dk/tso-electricity/REcoverageMunicipality#metadata-info>

10. Demonstration af teknologi til smart adfærd og logistik

Digital tvilling-teknologi kan bruges til at forudsige støjemissioner fra tungt udstyr på byggepladsen. Ved at anvende bygningsinformationsmodellering (BIM) kan byggebranchen effektivt kortlægge og reducere støjniveauer, hvilket er kritisk i byområder, hvor byggeaktiviteter kan påvirke omgivelserne. Metodologien inkluderer brug af CAD-software og realtidsdata fra sensorer til at skabe detaljerede støjkort, der hjælper med at optimere byggeprocesser og minimere gener for nærområdet.

10.1 Udvikling og implementering af forecast algoritmer

Digital Twin Platformen spiller en afgørende rolle i indsamlingen og streaming af rå maskindata via IoT-sensorer til en tilgængelig cloud-lagringsplads. Her filtrerer et forbehandlingsmodul først dataene for fejlagtige elementer og behandler dem derefter online til emissionsberegning ved at anvende forenklede matematiske formler. Til sidst omdannes de resulterende informationer til inputværdier til en Discrete Event Simulation (DES) model. Denne model undersøger, hvor miljøvenlig og økonomisk favorabel byggeprocessen har potentiale for at være. Efterfølgende præsenterer en User Interface (UI) resultaterne for slutbrugeren i et visuelt og tilgængeligt dashboardformat i kommercielt tilgængelige webbrowsere. Som vist i FIGUR 41 inkorporerer de designede tekniske komponenter i dette workflow problemfrit noget manuelt brugerinput, hvilket fremmer et samarbejdsorienteret og interaktivt arbejdsmiljø, hvor det er let at finjustere de nødvendige parametre for at køre DES, som forudsiger resultater, der tidligere ikke var tilgængelige.



FIGUR 41. Arbejdsflow for indsamling, kommunikation, behandling og overførsel af emissionsinformation til DTP (Digital Twin Platform).

DES involverer modellering af systemer, hvor tilstandsvariablen ændrer sig på specifikke tidspunkter. Det er fundet alment anvendeligt som en effektiv teknik til at forstå systemadfærd og vurdere forskellige operationelle strategier. Siden introduktionen af CYCLic Operations Network (CYCLONE) har det været afgørende for udviklingen af computerbaserede simulationsmodeller til byggeprojekter med det formål at analysere og optimere deres ydeevne. Efter CYCLONE's

introduktion opstod en række forskellige bygningssimuleringssystemer, herunder STROBOSCOPE, RiSim og SDESA. DES blev også implementeret til at estimere bygningsemissioner ved at undersøge belastningsfaktorer baseret på forskellige udstyrsaktiviteter. Ud over andre værktøjer dukkede SimPy op som et open source-bibliotek, der inkluderer komponenter, som muliggør DES-arbejdsgange på en effektiv måde. Disse simuleringssystemer tilbyder værdifulde værktøjer for projektledere til at gengive de dynamiske interaktioner mellem ressourcer og aktiviteter, hvilket letter en omfattende præstationsevaluering og generering af indsigt.

Flere trin er involveret i arbejdsgangen for dataregistrering, kommunikation, behandling og visualisering:

1. Registrering af rå data om udstyrsemissioner og positionsdata (sidstnævnte, hvis tilgængeligt)
2. Trådløs kommunikation til cloud-lagringsplads via mobilnetværk
3. Behandling af rå datastreams online ved anvendelse af forenklede matematiske konverteringer
4. Vurdering ved at anvende grundlæggende grænseværdier for at opdage emissionsoverskridelser, der overtræder regler
5. Kobling af resultaterne til parametre for allerede eksisterende elementer i 4D BIM-modeller,
6. Anvendelse af denne automatisk genererede information samt yderligere manuelle input som værdier til at køre DES,
7. Visualisering af resultaterne som en del af et dashboard i DTP.

For demonstration er metoden anvendt på byggepladsen i Aarhus, hvor der er involveret to alternative byggeplaner med op til to borerigge, der skal oprette armerede betonpæle til en fundamentmur, én gravemaskine, der lægger det udgravede jordmateriale fra de borede pæle i mindst én dump truck, der transporterer materialet væk fra byggepladsen.

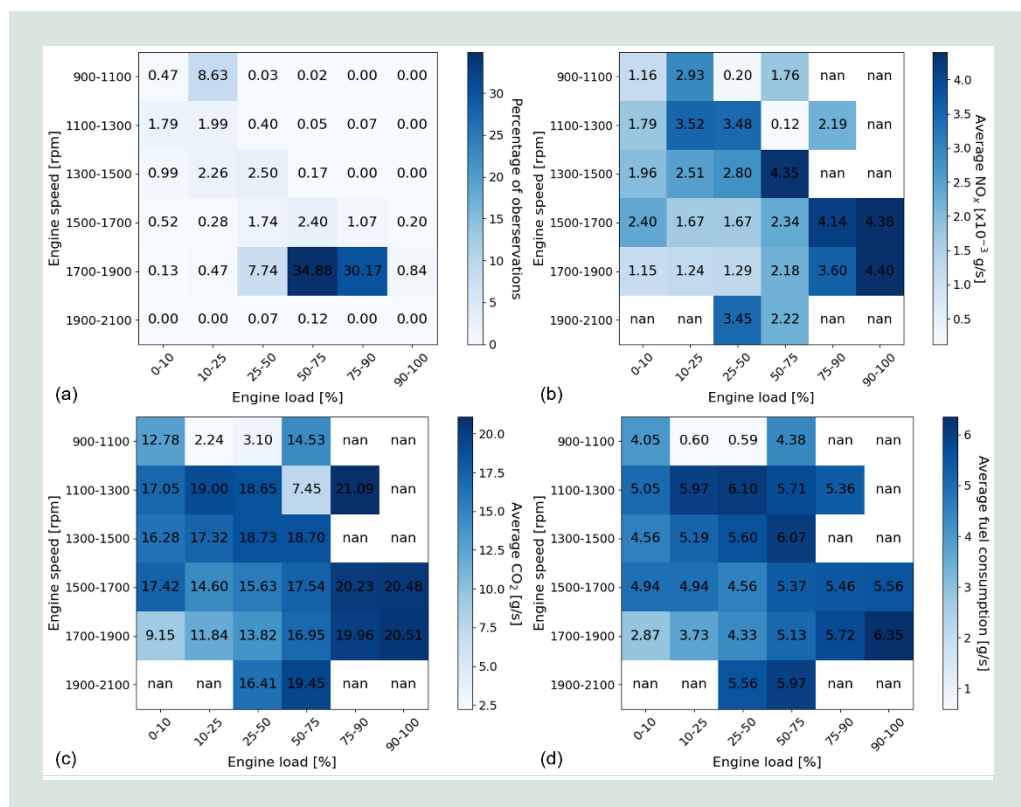
Efter dataindsamling fortsatte vi med at vurdere påvirkningen af motoreffekt og motorbelastning på emissionerne i forbindelse med, at maskinen befinder sig i flere tilstande, herunder direkte arbejde, støttearbejde og andre arbejdsformer, inklusive tomgang. Først fjernede vi datapunkter, hvor motoromdrejningerne var under 800 omdr./min., da det er usandsynligt, at motorer arbejder ved sådanne hastigheder i praktiske scenarier. Baseret på observation og indledende analyse ved at kontrollere fordelingen af motoromdrejningstal, når maskinen står i tomgang, definerede vi tomgangstilstanden som værende mellem 800 rpm og 900 rpm. Vi beregnede gennemsnitsværdien for emissionsraten (g/s) af CO₂, NO_x og forbruget (g/s) af brændstof i tomgangstilstand, som derefter bruges i DES til at simulere emissionen og forbruget af maskiner i tomgang, som vist i TABEL 17.

TABEL 17. Gennemsnitlig NO_x- og CO₂-emission samt brændstofforbrug for udstyr i tomgang.

Udstyr	NO _x (10 ⁻³ g/s)	CO ₂ (g/s)	Fuel (g/s)
Drilling rig – Bauer BG 355G	13,8	5,38	1,71
Excavator CAT 325F	3,77	2,2	0,5
Truck – Izuzu FTR850 AMT	0,87	1,21	0,38

For andre arbejdsmodi blev der oprettet et observationsvarmekort over motorhastighed og motorbelastning. Tilgangen fokuserede på at skabe informative varmekort til automatisk at opdage maskinens driftstilstand baseret på specifikt motorhastighed, motorbelastning og emissionsværdier. Det første trin omfattede udtrækning af de relevante data fra datasættet og derefter opdeling af motorhastighed og motorbelastning i sektioner for at opbygge et mere detaljeret gitter til varmekortet. Processen fortsatte med at beregne den gennemsnitlige NO_x-emission inden for

hvert gitterelement ved at anvende visse filtreringsbetingelser på datasættet. Den samme proces blev brugt for CO₂-værdierne og for brændstofforbruget. Derudover visualiserede vi de resulterende informationsdata som et varmekort ved hjælp af et farveskema til at repræsentere gennemsnitlige emissioner og inkluderede annotationer for tydelighed. Akseetiketter og en titel giver kontekst, og en farvebar hjælper med fortolkningen. FIGUR 42 præsenterer de beregnede varmekort for boreriggen alene. FIGUR 42 viser CO₂- og NO_x-emissionsraten samt brændstofforbruget, når boreriggen arbejder ved forskellige sektioner af motorbelastning og hastighed. FIGUR 42 (b-d) er oprettet ud fra observationen af alle arbejdsmodi og afspejler korrelationen mellem emissioner og motorhastighed samt belastning, som derfor også bruges til simulering af andre arbejdsmodi.



FIGUR 42. Heatmaps for CAT 325F gravemaskinen, når den er i læssetilstand under 3 timers observeret arbejde.

Overordnet set observeres der få afvigelser i motorbelastningen og hastigheden, og derfor kan emissionerne automatisk associeres, når motorparametrene falder inden for de driftsmodi, som er beskrevet ovenfor. Dette udgør også en nyttig kilde til inputdata til opbygning af en forenklet DES for udstyrsemissioner.

For læsseaktiviteten, som vist i FIGUR 42, arbejder gravemaskinen i høj motorbelastning størstedelen af tiden (50 % - 90 %) og ved mellem 1700 rpm og 1900 rpm. Det er en mere intensiv aktivitet, og det er logisk at observere forskellen i motorbelastning og motorhastighed mellem læsse- og tomgangsaktivitet. På samme måde er brændstofforbruget og CO₂-emissionsraten meget højere end ved tomgangsaktivitet, mens NO_x-emissionen viser en betydelig monoton korrelation med motorhastighed og motorbelastning. Dette forklares med tilstedeværelsen af en katalysator i maskinen, som aktiveres, når temperaturen når over 120°C.

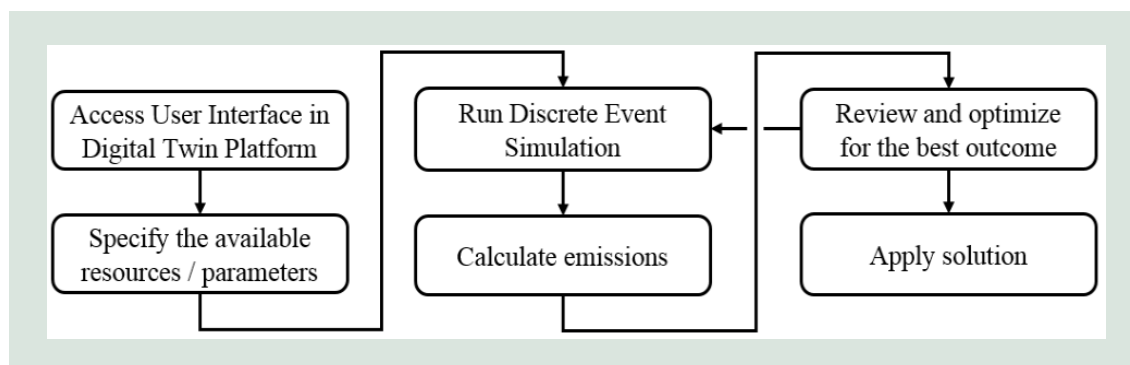
Baseret på de live registrerede PEMS-emissionsdata genereres to arrays: et sandsynlighedsarray og et værdiarray. Sandsynlighedsarray indkapsler sandsynligheden for motorhastighed og

belastning af maskinen, når den er i forskellige arbejdsmodi. Samtidig forbinder værdiarray reelle gennemsnitsværdier med hver kombination af motorhastighed og belastning. Kernen i vores metode involverer beregningen af kumulative sandsynligheder. Efter at have fladet sandsynlighedsarray ud, beregnede vi de kumulative sandsynligheder for dette array. Det næste trin er genereringen af tilfældige tal, der er jævnt fordelt mellem 0 og 1. Herefter identificerede vores tilgang den tilsvarende kombination af motorbelastning og hastighed for hvert tilfældigt genereret tal. Fra simuleringen modtager vi tiden for hver maskines drift i enheden sekunder. For hvert sekund estimerer vi emissions- og forbrugsberegningen baseret på de specificerede sandsynligheder og tilknyttede værdier. Det endelige resultat er en sum af emissions- og forbrugsværdier, der er udtaget fra fordelingen.

Vi brugte SimPy-simuleringsmotoren til at udføre DES. SimPy er et open-source procesbaseret diskret-begivenheds simuleringsframework for Python. Det giver de nødvendige komponenter til at modellere og simulere komplekse systemer med diskrete begivenheder, såsom tidsudvikling og interaktioner mellem forskellige enheder i simuleringen (TABEL 18). Simuleringen (FIGUR 43) starter med, at en menneskelig bruger indtaster adskillige inputparametre, som den skal bruge for at køre (se TABEL 19).

TABEL 18. Tidsfordelinger af aktiviteter for byggemaskiner anvendt i DES.

Equipment	Working modes	Time Distribution
Drilling	Drilling Idling	Uniform (10,14) [min]
		Normal (30,1) [sec]
Excavator	Loading Idling	Normal (25,5) [sec]
Truck	Driving Idling	Uniform (5,8) [min]



FIGUR 43. Simuleringslogik til at hente den ønskede løsning.

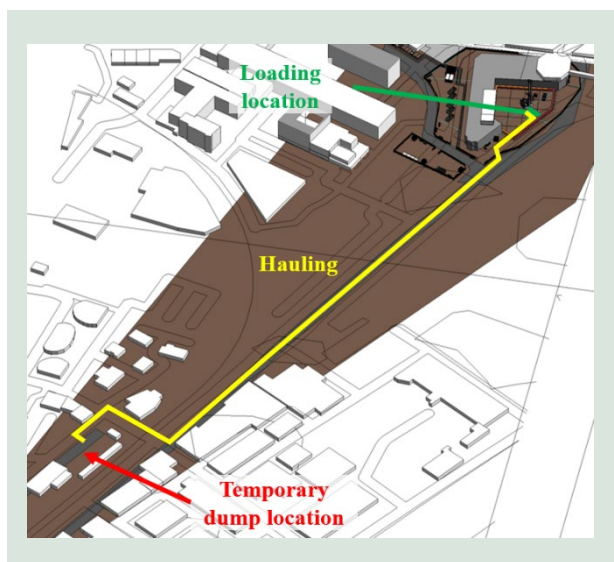
TABEL 19. Simuleringsparametre og forvalgte enheder.

Parameter	Explanation	Units
Simulation time	The corresponding work time the simulation runs	Min [480min=1 workday]
Excavator	Loading material on dump truck, idling at times	No. [1]
Dump truck/s	Hauling off material, idling at times	No. [1..n]
Drilling rig/s	Boring piles in uncertain soil conditions, unloading material, idling at times	No. [1-2]
Distance to travel	Hauling distance from construction to dump site	Km [1..30]
Initial soil amount	The amount of soil left over from previous drills	m ³ [1..n]
Soil type variations	Possibility of slightly varying excavated soil	Factor [1-3]
Excavator bucket size	Volume for one swing of the excavator arm	m ³
Truck capacity	Truck bed size, incl. bank and loose states	m ³ [5-10]

Antallet af tilgængelige læssepladser svarer til antallet af gravemaskiner på stedet. Når en lastbil er ved en læsseplads, venter den, mens den tildelte gravemaskine påbegynder fyldningsoperationen og vender tilbage til tomgangstilstand efterfølgende. Fyldningsoperationen relaterer til fyldningstiden. Når en dump truck er fyldt, forlader den byggepladsen for at transportere det udgravede jord til en midlertidig deponering. Hvis en anden lastbil venter på sin tur, optager den straks den nyligt ledige læsseplads, hvilket sikrer en effektiv udnyttelse af læsseren. Omvendt, hvis alle læssepladser er midlertidigt optaget, skifter gravemaskinen til tomgangstilstand, indtil dens tjenester er påkrævet. Læsseprocessen følger foruddefinerede parametre, specifikt lastbilens kapacitet og gravemaskinens skovlstørrelse, under hensyntagen til bank- og løs-tilstande, som sammen bestemmer fyldningseffektiviteten. Det er værd at bemærke, at boreudstyret fungerer uafhængigt af gravemaskine-dump truck-systemet. Boreudstyret udfører boreoperationer og kan gå ind i meget korte tomgangsperioder, når der opstår store ændringer i jordtypeklassifikationer, med varigheden styret af fordelingsmønstre. Denne strukturerede tilgang har til hensigt at optimere effektiviteten på byggepladsen og sikre, at ressourceallokeringen stemmer overens med operationelle krav.



76 Miljøstyrelsen / Fremtidens Grønne Byggeplads



FIGUR 45. BIM-baseret construction site layout visible online in the DTP.

Vores DTP indeholder et BIM-baseret byggepladslayout, der er knyttet via Autodesk Platform Services til DES, som er tilgængelig online i en webbrowser. De simulerede scenarier gør det muligt at ændre enhver af parametrene i den grafiske brugergrænseflade, der er oprettet til simuleringen (FIGUR 46). For eksempel kan transportafstand ændres fra en nærliggende placering (1 km) til en længere afstand (30 km), hvilket øger transporttiden, skaber flere emissioner og højere tomgangstider, medmindre slutbrugeren (en projektleder) vælger at køre DES for at optimere systemet i forhold til både miljømæssige og økonomiske mål. Detaljerede resultater fra simuleringen kan findes på dashboard i DTP og i en genereret CSV-fil, som gør det muligt for brugerne at vurdere de emissioner, der genereres af hver maskine under forskellige aktiviteter.

Simulation Overview					
Sim. Time [mins]	Drilling rig(s) [No]	Loader(s) [No]	Truck(s) [No]	Initial amount of soil [m3]	Run Simulation Reset Show Soil Level
200	1	1	1	11	
Distance To Travel [km]	Drilling rig Brand	Bucket Size [m3]	Truck Capacity [m3]	SoilType	
10	Bauer 355G	2	10	Clay	
	Loader Brand	Truck Brand	Soil Disruption %		
	Caterpillar Excavator 325	Isuzu	10		

FIGUR 46. Grafisk brugerflade er lavet til simulering.

Til demonstration blev der simuleret to alternativer baseret på det realistiske simuleringsscenario. Det ene fungerer som et basisscenarie (Alternativ A), hvor én boremaskine, én lastbil og én læssekran anvendes til jordudgravning og transport i én dag. Alternativ B benytter én ekstra boremaskine, mens de øvrige parametre er identiske.

I sammenligningen mellem de to alternative byggeplaner (TABEL 20: A and B) er det tydeligt, at anvendelsen af to boremaskiner i stedet for én er mest produktiv. I samme arbejdstimer, med to boremaskiner i drift, udgravede Alternativ B næsten dobbelt så meget (199,04 %) jord som A

(158,12 m³ vs. 79,44 m³), og lastbilerne flyttede også dobbelt så meget jord (153,33 m³ vs. 76,07 m³). Samtidig er summen af alle emissionsværdier (NO_x og CO₂) og det samlede brændstofforbrug for alle maskiner kun steget med (57,65 %, 70,05 % og 74,39 %).

Det er tydeligt, at med én ekstra boremaskine fordobles produktiviteten af jordudgravning sammenlignet med scenariet med kun én boremaskine. Dette på trods af det samme antal tilgængelige lastbiler og læssere. Den jord, der transporteres af lastbilen, fordobles også, hvilket indikerer, at produktiviteten af lastbilen og læsseren følger med boremaskinerne. Fra sammenligning af emissioner og forbrug kan vi se, at emissionerne og forbruget fra to boremaskiner næsten er dobbelt så høje som ved en enkelt brug.

På trods af at lastbilerne kører frem og tilbage to gange i Alternativ B sammenlignet med Alternativ A, viser emissionsværdierne at være tæt på hinanden på grund af den sammenlignelige emissionsrate ved forskellige arbejdsformer. Gravemaskinen udleder flere CO₂-emissioner og bruger mere brændstof i Alternativ B, da den har færre tomgangstider og udfører flere læssecykler.

TABEL 20. Resultaterne af en forenklet DES, der sammenligner to driftssystemer (B, der består af en ekstra boremaskine): Valget mellem at vælge alternativ byggeplan A eller B afhænger af miljømæssige og økonomiske mål.

Machine	Time [min]	NO _x [g]	CO ₂ [kg]	Fuel [kg]	Soil moved [m ³]
Drilling rig 1	477,48 (A)	149,21 (A)	191,82 (A)	60,79 (A)	79,44 (A)
	475,86 (B)	148,8 (B)	191,15 (B)	60,58 (B)	158,12 (B)
Drilling	398,3 (A)	83,64 (A)	166,28	52,66 (A)	
	369,8 (B)	83,33 (B)	165,65	52,46 (B)	
Idling	79,18 (A)	65,56 (A)	25,54	8,13 (A)	
	79,06 (B)	65,46 (B)	25,50	8,12 (B)	
Drilling rig 2	475,98 (B)	148,79 (B)	191,21 (B)	60,59 (B)	
Drilling	369,9 (B)	83,31 (B)	165,70 (B)	52,48 (B)	
Idling	79,08 (B)	65,48 (B)	25,51 (B)	8,12 (B)	
Loader	460,59 (A)	102,78 (A)	67,99 (A)	16,25 (A)	
	469,49 (B)	103,26 (B)	76,68 (B)	18,91 (B)	
Idling	446,3 (A)	101,07 (A)	58,81 (A)	13,48 (A)	
	440,67 (B)	99,79 (B)	58,06 (B)	13,31 (B)	
Loading	14,29 (A)	1,71 (A)	9,19 (A)	2,77 (A)	
	28,82 (B)	3,46 (B)	18,61 (B)	5,60 (B)	
Truck	477,37 (A)	7,25 (A)	25,03 (A)	7,84 (A)	76,07 (A)
	477,11 (B)	7,84 (B)	25,34 (B)	7,94 (B)	153,33 (B)
Idling	395,03 (A)	2,96 (A)	19,04 (A)	5,97 (A)	
	381,46 (B)	2,86 (B)	18,38 (B)	5,76 (B)	
Loading	33,76 (A)	1,76 (A)	2,46 (A)	0,77 (A)	
	32,79 (B)	1,71 (B)	2,39 (B)	0,75 (B)	
Hauling	15,24 (A)	0,79 (A)	1,11 (A)	0,35 (A)	
	30,73 (B)	1,60 (B)	2,24 (B)	0,70 (B)	
Unloading	33,34 (A)	1,74 (A)	2,43 (A)	0,76 (A)	
	32,13 (B)	1,67 (B)	2,34 (B)	0,73 (B)	
Soil left [m ³]					8,38 (A)
					9,78 (B)

Machine	Time [min]	NOx [g]	CO ₂ [kg]	Fuel [kg]	Soil [m ³]	moved
Sum	480 (A)	259,24 (A)	284,84 (A)	84,88 (A)		
	480 (B)	408,69 (B)	484,38 (B)	148,02 (B)		
Factor (B-A/A) [%]		57,65%	70,05%	74,39%	99,04%	
Emission/Work output		3,41 g/m ³ (A) 2,67 g/m ³ (B)	3,15 kg/m ³	1.16 kg/m ³ (A) 0,97 kg/m ³		
Alternative: A or B						

En vigtig opdagelse er, at alternativ byggeplan B fordoblede mængden af jordoverførsel inden for samme arbejdstid, hvilket resulterede i højere produktivitet og færre emissioner pr. enhed af arbejdsoutput, som vist i TABEL 20. Som forventet bruger boremaskinen en betydelig mængde dieselbrændstof, hvilket medfører højere emissioner. Gravemaskinen følger som den næststørste udleder, efterfulgt af dump trucken(e). CO₂-emissioner viser en stærk korrelation med brændstofforbrug på tværs af alle maskiner. Disse indsigter giver et omfattende overblik over emissioner fra maskinparken og hjælper med miljøbevidst beslutningstagning og optimeringsindsatser.

Selvom simuleringen præsenterede et bemærkelsesværdigt tilfælde af sammenligning af alternative byggeplaner (ressourcer og tidsplaner), blev den oprindelige værdi genereret ved vurdering af miljømæssige vs. økonomiske projektmål.

Den overordnede arbejdsgang og metode har vist sig at fungere effektivt, men yderligere arbejde er nødvendigt for at udforske mere komplekse byggescenarier. Dette inkluderer en statistisk analyse af resultaterne og konsekvenserne for miljøpolitikker. Fremtidigt arbejde kan også undersøge Agent Based Modelling (ABM) (simuleringer). Eksisterende ABM replikerer primært, hvordan individer inden for en organisation eller på tværs af forskellige organisationer interagerer i et syntetisk miljø, hvor agenter træffer beslutninger og engagerer sig i kommunikation. Flere studier har dog undersøgt brugen af ABM for at forbedre effektiviteten i byggeoperationer. Med hensyn til deres arbejde har ABM vist sig at være værdifuldt, især i jordflytteoperationer, på grund af dets evne til at imødekomme forskellige udstyrs specifikationer og give mere præcise tids- og omkostningsestimater sammenlignet med simuleringsmetoder som Discrete Event Simulation (DES).

Udover at forskere bruger ABM til at simulere jordflytteoperationer ved at udstyre udstyrsagenter med tilstandskort og statiske og dynamiske egenskaber, kan ABM også anvendes til at evaluere, hvordan trafikpropper og trafikflow af udstyrsagenter uden for stedet påvirker effektiviteten af jordflytning.

10.2 Digital tvilling til at forudsige støjemissioner fra tungt udstyr på byggepladsen

Bygningsinformationsmodellering (BIM) anvendes i vid udstrækning i byggebranchen til projektledelse, herunder tids- og omkostningskontrol. Mange studier har fokuseret på at anvende BIM-metoder til facilitetsstyring, kvalitetskontrol, kollision detektion og sikkerhedsforanstaltninger for arbejdstagere. Forskere undersøger potentialet ved digitalisering i byggebranchen, især gennem BIM og Digital Twin (DT) teknologier, for at udvikle effektive metoder til overvågning, sporing og reduktion af emissioner og forurening. BIM-modeller består af et bredt udvalg af data, herunder både semantisk og geometrisk information, som effektivt kan anvendes til at identificere støjkloder og deres respektive positioner. Derfor kan det udfylde forskningshullerne vedrørende forudsigelse og håndtering af byggepladsstøj under byggeprocessens planlægning.

Denne undersøgelse foreslår en BIM-baseret støjkortlægningsmetode, der udtrækker støjkilde-data fra BIM-modeller og genererer støjkort i overensstemmelse hermed. Målet er at vise, hvordan BIM kan forbedre processen med forudsigelse af byggepladsstøj og hvilke praktiske fordele der er ved at bruge støjkortlægningsmetoder til forudsigelse af byggepladsstøj. Rammerne fokuserer primært på byggeprojekter i et byområde og er blevet valideret med realtids overvågede støjdata fra et boligbyggeri. Resultaterne af denne undersøgelse forventes at hjælpe tidsplanlæggere og projektledere med at udvikle passende procesplaner, der tager højde for støj.

I det nuværende projekt er der implementeret flere Airnode-sensorer for effektivt at overvåge emissioner og støjniveauer fra byggeaktiviteter. Blandt de atten sensorer, der er installeret på byggepladsen, kan fire opfange og analysere støjdata ud over emissionsdata og andre relevante parametre. De specifikke sensorer, der refereres til i denne sammenhæng, er vist i FIGUR 47 (til højre), imens sensorernes generelle placering er illustreret i FIGUR 47 (til venstre). Det er værd at bemærke, at støjmålingerne opnået af sensorerne er baseret på en måleteknik med en sekunds interval, der inkorporerer A-weighting og en langsom målemetode. Desuden er det vigtigt at anerkende, at placeringen af sensorerne er defineret af Airnode-virkomheden baseret på parametre som strømforsyning, sikker installation og ikke at forhindre bevægelsesretningen for byggeudstyr. Optimering af sensorernes placering ligger uden for denne forsknings rammer.



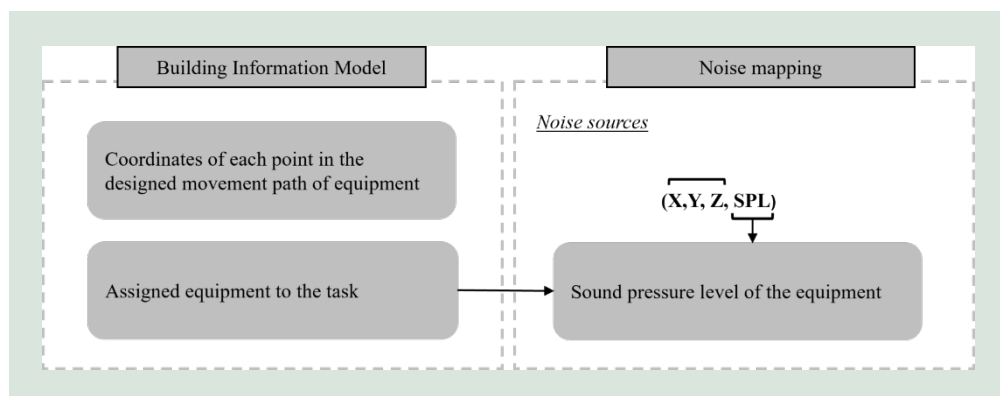
FIGUR 47. Placeringen af alle de installerede sensorer på projektet, inklusive støjsensorerne, der er markeret med grønne cirkler (billede til venstre), og en tættere visning af Airnode-sensorerne installeret i projektet til overvågning af støj- og emissionsværdier (billede til højre).

Metodologi

Building Information Modelling (BIM)

En BIM-model er en digital repræsentation af et byggeprojekt, der indeholder geometriske og semantiske data. De semantiske (ikke-fysiske) data kan beskrives som tidsplaner, zoner, materialer og komponentrelationer, som er inkluderet i en BIM-model. BIM-arbejdsmetoden kan anvendes på ethvert trin af designprocessen, fra tidligt konceptuelt design til detaljeret design, konstruktion og endda den udvidede driftsfase. BIM-baserede arbejdsmetoder reducerer desuden unøjagtigheder i bygningsdesignet og procesplanen, hvilket øger gennemsigtigheden i byggeprocessen. Denne gennemsigtighed kan hjælpe med definitionen og eksporten af nødvendige data for støjkloder på byggepladser. Den største udfordring ved at forudsige emissioner og støj, der udsendes fra byggeprocessen, er, at konventionelle tidsplaner og design ikke opbevarer semantiske data om processen. En hovedhindring er placeringen af udstyret, som ikke let kan tilgås fra den konventionelle tidsplan eller endda den designede model. I modsætning hertil kan BIM-modellen forbindes med den præcise geolokationsinformation for projektet og indstilles med de specifikke GNSS (Global Navigation Satellite System) koordinater. Dette hjælper med

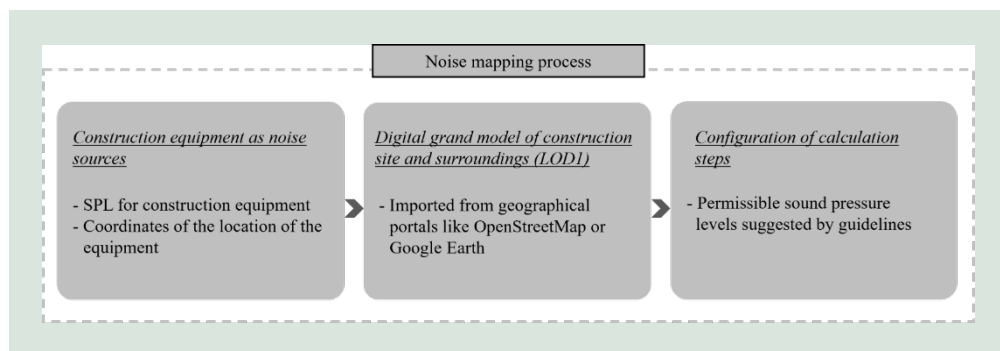
eksporten af alle koordinater for bevægelsesvejen af byggeudstyr, som er nødvendige for støjforudsigelser. Eksporteret data fra Bygningsinformationsmodellen til støjkortlægningsformål vises FIGUR 48.



FIGUR 48. Eksporteret data fra Building Information modellen til kortlægning af støjni-
veau.

Processen for kortlægning af støj

Den korrekte metode til forudsigelse af miljøstøj er gennem støjkortlægningsmetoder, som omfatter estimer af de forventede lydtryk på forskellige steder, herunder de nærliggende bygningers facader, som vises med farver. Af flere årsager blev CadnaA-software valgt til at implementere den foreslåede tilgang i denne forskning. Beregningsprocesserne anvendt af CadnaA er fuldt ud i overensstemmelse med ISO 9613, som er i overensstemmelse med retningslinjerne for reviderede midlertidige beregningsmetoder og Europakommissionens love, såsom Direktivet om Miljøstøj (2002/49/EF). Under beregningsstadiet udført af softwaren tildeles hvert modtagende punkt en værdi og en procentdel af støjkilden, idet alle refleksioner tages i betragtning. For at generere støjkort til byggeprocessen kræves tre forskellige datasæt: 1) støjklider; 2) projektets byggepladsplan; og 3) tilladte støjværdier i retningslinjerne. Den generelle proces vises i FIGUR 49.



FIGUR 49. Processen for forberedelse af støjkortlægning.

Site plan for byggepladsen

Den indledende skridt i forberedelsen af støjkort indebærer import af den digitale grundmodel. Siteplanen for byggepladsen, information om jorden omkring projektgrænserne og detaljer om nærliggende bygninger kan importeres fra geografiske databaser såsom OpenStreetMap og Google Earth i formater som XML, OSM og GML. Desuden, hvis byggeprojektets pladslayout-plan, som omfatter arrangementet af fysiske rum på stedet, er vigtig, skal den undersøges for mulige ændringer i den digitale grundmodel. Den importerede digitale model skal være mindst på LOD 1 (Level of Detail), hvor højde- og elevationsdata for området også er fanget. I kontek-

sten af 3D bymodellering refererer LOD til graden af information, der skal indarbejdes i modelleringen af forskellige strukturer og objekter. Standarder giver specifikationer for fem forskellige LOD'er, der spænder fra LOD 0 til LOD 4. Ved LOD 0 fremstilles bygninger som solide, todimensionale enheder, mens ved LOD 1 og videre bliver bygningerne vist med deres højde, og i LOD 4 gennem arkitektoniske detaljer såsom tagformer.

Desuden har støj kortlægningssoftwaren mulighed for at importere en geometrimodel af byggepladsplanen i et format som DWG eller DXF. American Institute of Architects (AIA, 2013) har skabt forskellige udviklingsniveauer (LOD) fra 100 til 500 for BIM-modeller for at kvantificere mængden af semantiske og geometriske data, de indeholder. Det er vigtigt at bemærke, at selvom de underliggende principper for begge sæt LOD'er er ens, er LOD for BIM-modeller forskellig fra 3D bymodeller. For eksempel, når LOD for en BIM-model er 300, karakteriseres modellen af præcise dimensioner og tilsvarende positioner (Bormann et al., 2018). Det er bemærkelsesværdigt, at når man vurderer geometrimodeller på højere LOD'er, såsom LOD 300, forlænges den beregningsmæssige kørselstid i støj kortlægningssoftwaren.

Når byggepladsplanen er indlæst i støj kortlægningsprogrammet, kan følsomme modtagere identificeres. Følsomme modtagere, der kan blive væsentligt påvirket af støj, omfatter skoler, hospitaler, sanatorier, rehabiliteringsfaciliteter og boligbygninger, der ligger i nærheden af byggepladsen. Disse strukturers facader er blevet udpeget som støjmodtagende steder. Desuden, hvis der er installeret nogen sensorer på byggepladsen til at overvåge byggepladsstøj, kan deres præcise placering også defineres som modtagerpunktet i modellen.

Støj kilder

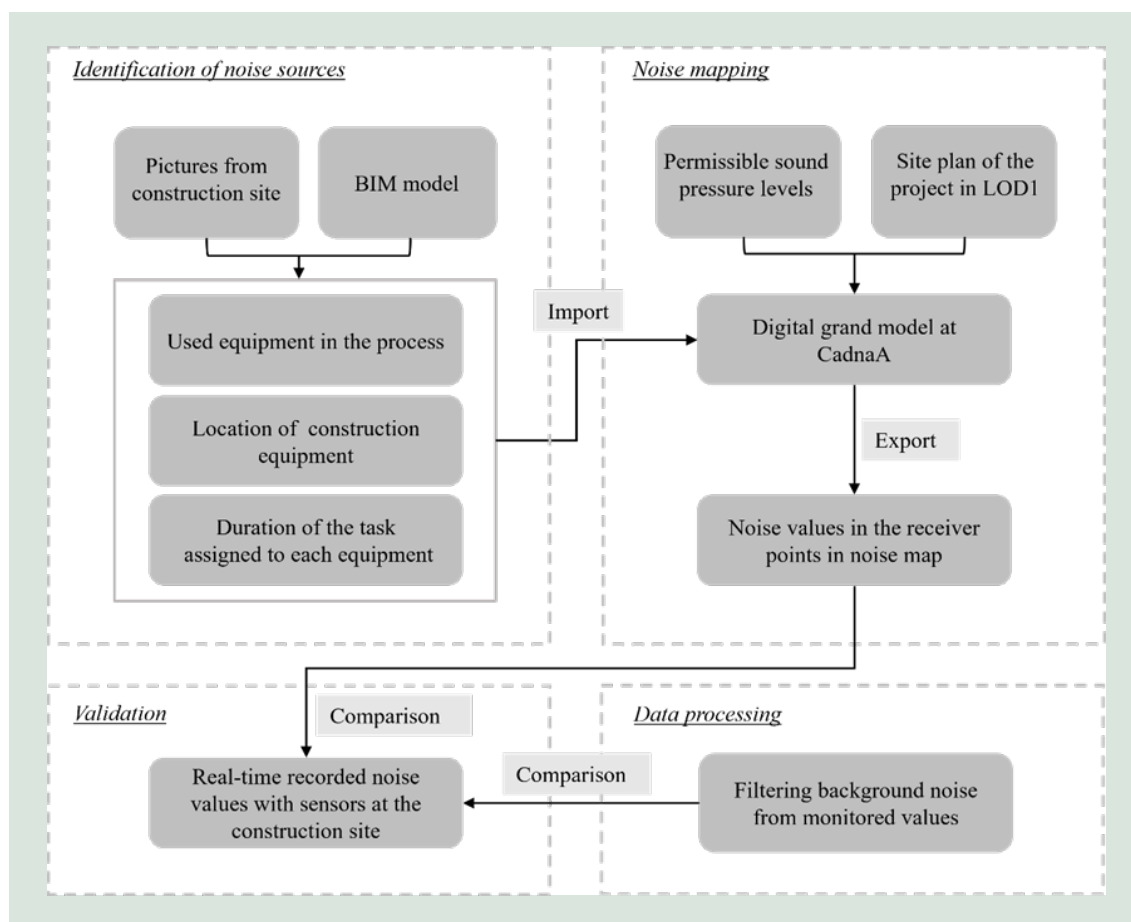
Næste skridt er at etablere og integrere støj kilder i den digitale grundmodel. Støj kildedata omfatter byggeudstyr og dets tilsvarende bevægelsesveje. Detaljeret information om byggeprocessen, herunder antal og type af udstyr, der er afsat til opgaven, udstyrets placering og opgavens varighed, kan udtrækkes fra 4D BIM-modellen. 4D BIM-modellen er en tidslinket 3D BIM-model. Denne model blev oprettet ved at inkorporere tidsplanegenskaber i de forskellige dele af 3D geometrimodellen. Denne integration hjælper med at forbedre visualiseringen af byggeprocessen. Det er derfor nødvendigt at eksportere 3D BIM-modellen i et IFC (Industrial Foundation Classes) udvekslingsformat og importere den til BIM-baserede tidsplanlægningsplatforme. IFC er et format, der er uafhængigt af leverandører, hvilket muliggør overførsel af information mellem forskellige BIM-platforme. Følgelig skal 3D-modellen, specielt forberedt i Revit til dette arbejde, være etableret med projektplaceringen. Geometrimodellen importeres derefter som en IFC-model til DESITE-BIM, en BIM-baseret tidsplanlægningsplatform, der anvendes i denne undersøgelse.

På dette stadium er alle attributter relateret til den rette tidskomponent og tildelt udstyr blevet inkorporeret i processen. Efter at have bekræftet, at projektplaceringen er korrekt indstillet i 4D BIM-modellen, kan koordinaterne for hver placering eller bevægelsesvej af støjende byggeudstyr eksporteres. Information såsom lydstyrkeniveauet (LWA) for byggeudstyr kan opnås ved at gennemgå tidligere forskning og informationskataloger for byggeudstyr. Disse værdier importeres som en Excel-fil til støj kortlægningsplatformen sammen med definitionen af støj kilder.

Tilladte lydtryksniveauer

I den afsluttende fase skal beregningskonfigurationen afsluttes. Dette omfatter retningslinjerne og tilladte lydtryksniveauer, der skal følges under simuleringen, den definerede varighed af dag, aften og nat i de relevante retningslinjer samt det grid, hvor beregningen skal udføres. Forskellige organisationer, såsom Occupational Safety and Health Administration i USA (OSHA, 2022) og ækvivalente administrationer i andre lande, har fastsat regler og restriktioner for byggepladsstøj for at beskytte arbejdstageres og lokalsamfundets velbefindende nær byggepladser. Visse lande, såsom Tyskland, har specifikke reguleringer for byggepladsstøj (AVV, 1970). I Danmark er det inkluderet i de generelle miljøstøjlove. De tilladte lydtryksniveauer for byggepladsstøj i

arbejdstiden (normalt fra 07:00–20:00; dette kan variere afhængigt af landet) afhænger af byggeprojektets placering (beboelses-, industri- eller blandede anvendelsesområder) og må ikke overskride de værdier, der tilbydes af retningslinjerne i nabolaget. Støjkortlægningsprocessen kræver definition af de tilladte lydtryksniveauer, varigheden af dag, aften og nat baseret på retningslinjer samt kategorisering af arealanvendelsen for området til detaljerede beregninger. For at verificere nøjagtigheden af støjkortene sammenlignede vi dem med realtids overvågede data og fotos taget på byggepladsen. Den generelle oversigt over den BIM-baserede støjforudsigelsesmetode vises i FIGUR 50.



FIGUR 50. Den generelle oversigt over den BIM-baserede støjforudsigelsesmetode.

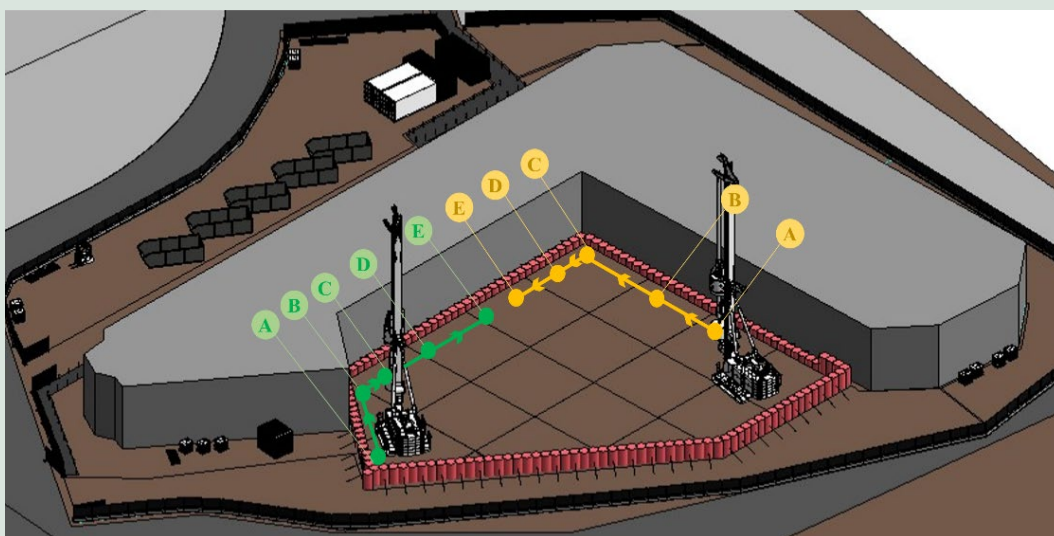
Implementering

Området ved byggepladsen blev opdelt i to zoner, som vist i FIGUR 51, hvor det omgivende naboerområde består af kontorer og en filmskole, som er repræsenteret ved Zone 1, mens fabrikken på den anden side er repræsenteret ved Zone 2. Formålet med disse støjkort er at overvåge støjrelaterede gener i Zone 1, som er hjemsted for uddannelsesinstitutioner og erhvervsvirksomheder.



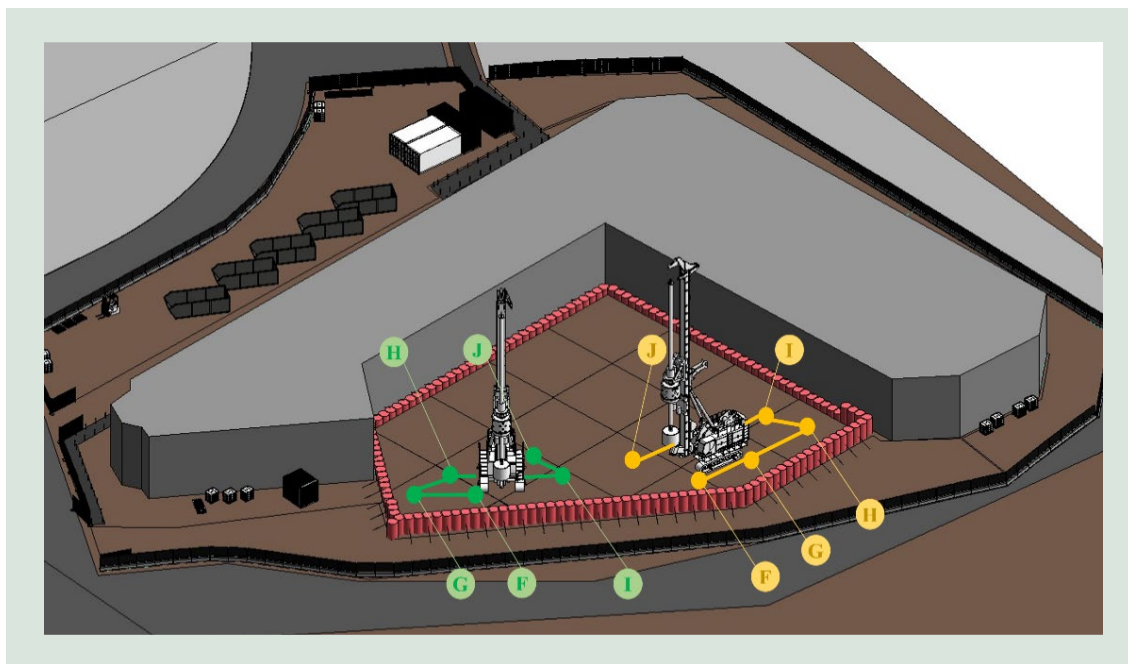
FIGUR 51. Satellitbillede (Google Earth, januar 2020), der viser nabolaget omkring byggepladsen (venstre billede) og under den afsluttende forberedelse af byggepladsen (første oktober 2022) (højre billede).

BIM-modellen af jordarbejdet og sekantpælemuren blev modelleret på den BIM-baserede platform Revit, og tidsplanen for processerne er blevet analyseret. To boreudstyr fra producenten BAUER med modelnumrene 'BG55' og 'BG35' og et lydstyrkeniveau på 112 dB er valgt til den følgende opgave. Derudover støtter en betonblander med 101 dB, en læsser med 75 dB og to gravemaskiner med 105 dB og 90 dB lydstyrkeniveau installationsprocessen af sekantvægge. Projektets placering er knyttet til dens geolokation i BIM-modellen, hvilket muliggør eksport af de præcise koordinater for hvert punkt vist i FIGUR 52 (punkter A, B, C, D og E) fra modellen.



FIGUR 52. Den designede bevægelsesvej for to boreudstyr ved slutningen af projektet tæt på Zone 1.

Som planlagt vil de to boremaskiner arbejde samtidig, startende fra punkt A og fortsætte til punkt E. Lige efter installationen af væggene er færdig, vil boremaskinerne begynde at bore i den modsatte ende af byggepladsen, som illustreret i FIGUR 53 (punkt F, G, H, I, J).

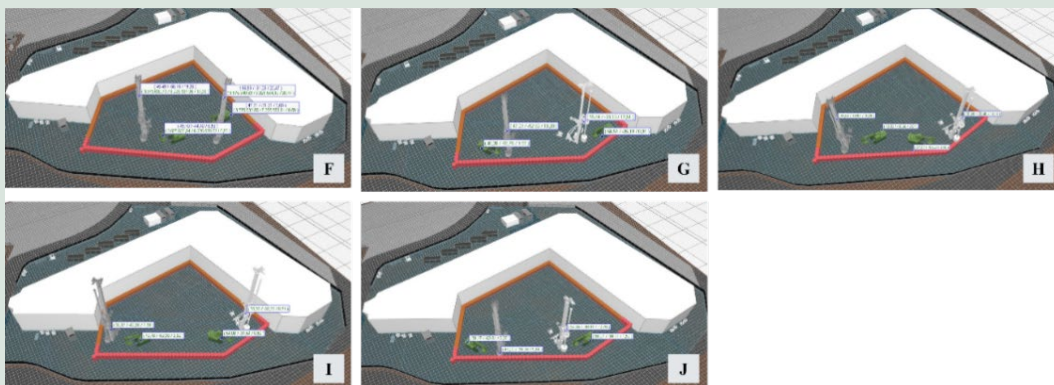


FIGUR 53. Den designede bevægelsesvej for to boreudstyr ved slutningen af projektet tæt på Zone 2.

Forberedelse af støjkort

For at generere støjkort involverer den indledende fase import af stedplaceringdetaljer fra Open-StreetMap, som er en geografisk database, der indeholder højdedata for de omkringliggende bygninger. Arbejdsdagens varighed, fra 08:00 til 17:00, er fastlagt baseret på byggeprojektets rapporter. I overensstemmelse med miljøstøjreglerne fastsat af den danske Miljøbeskyttelsesstyrelse (Danish EPA, 2012), er støjreglerne primært rettet mod miljømæssig og industriel støj, uden specifikke retningslinjer for byggeplads støj som observeret i andre lande som Tyskland. Da området består af industrielle bygninger, arbejdspladser og uddannelsescentre er området klassificeret som et "erhvervs- og industriområde med begrænsninger". Ifølge de danske miljøstøjregler er de tilladte støjniveauer angivet til 60 dB(A). De følgende beregninger og opsætninger vil også følge disse værdier. Ifølge anbefalingerne fra (ISO 9613-2, 1996) kan luftdæmpning negligeres for afstande mindre end 250 m. Vindhastighedens effekt på lydpropagation bliver også mere betydningsfuld over længere afstande. Dæmpningseffekten af vinden og meteorologiske faktorer er blevet negligeret i beregningen.

Det nævnte byggeudstyr er defineret som en støjkilde, der følger de stier, der er skitseret i FIGUR 9, specifikt de gule og grønne spor. Da den resterende struktur af den oprindelige bygning har potentiale til at fungere som en naturlig barriere mod støjtransmission, var det primære mål med at designe denne bevægelsesvej at tage højde for eventuelle forstyrrelser af uddannelsescentret beliggende på venstre side af byggepladsen, som angivet i FIGUR 8. Når den digitale grand model og støjklenderne er importeret, bliver facaderne af de omkringliggende bygninger udpeget som modtagerpunkter for beregningen. De nødvendige konfigurationer for beregningstrinene, inklusiv reference tidsværdier for dag, aften og nat, implementeres. Endeligt blev støjkortene forberedt gradvist for de nævnte punkter i FIGUR 54.

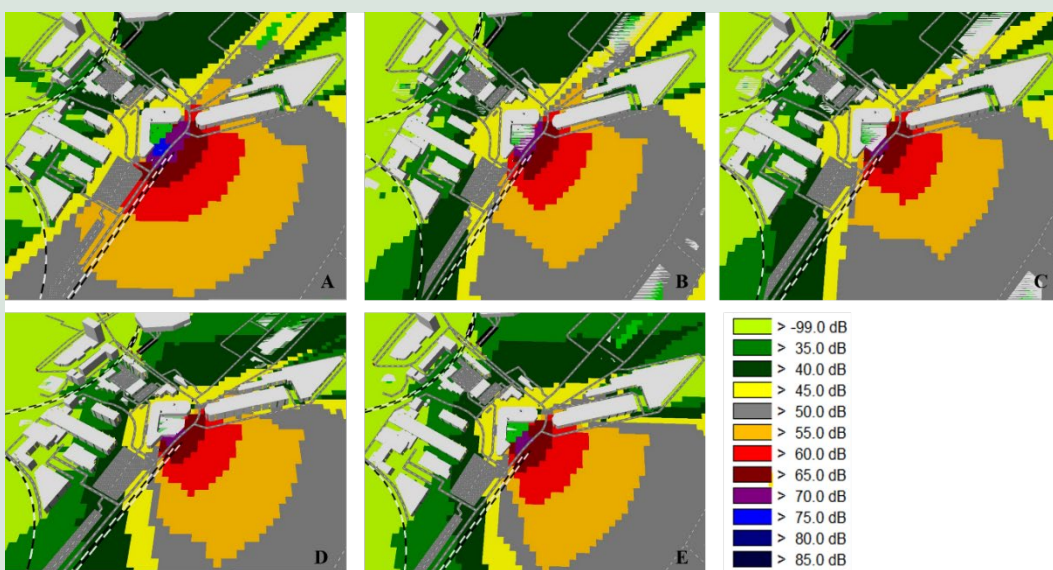


FIGUR 54. Eksport af lokalitetsdata for byggeudstyr fra DESITE-BIM (en 4D BIM visualiseringsplatform).

Resultater

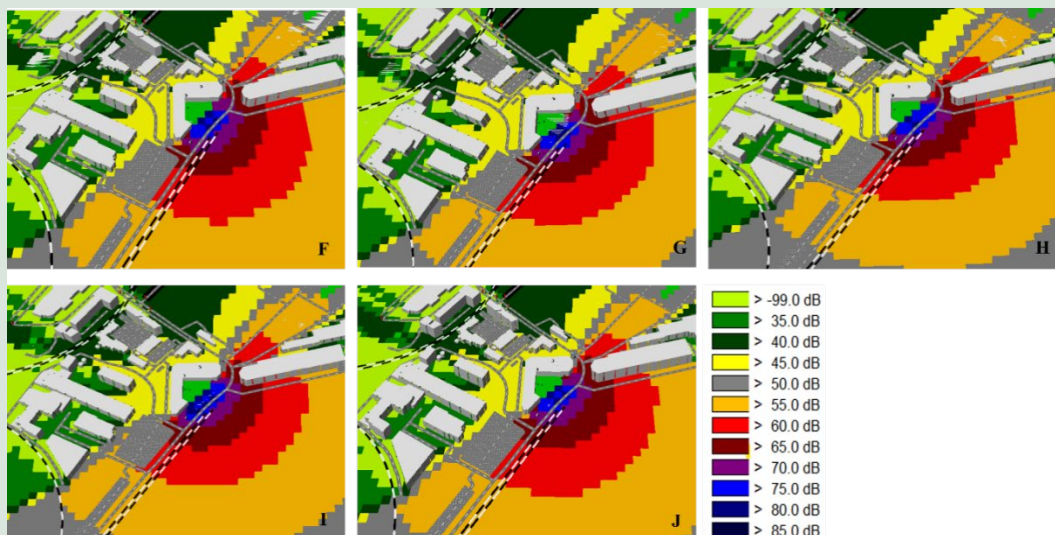
Støjkort

For hvert punkt angivet i FIGUR 53, er der udført støjudbredelsesberegninger, og støjkort er blevet oprettet. Imens FIGUR 55 viser resultaterne af støjudbredelsen i et område, når to boreudstyr arbejder samtidig ifølge bevægelsesvejen i FIGUR 53, viser FIGUR 56 støjudbredelsen for bevægelsesvejen designet i FIGUR 41.



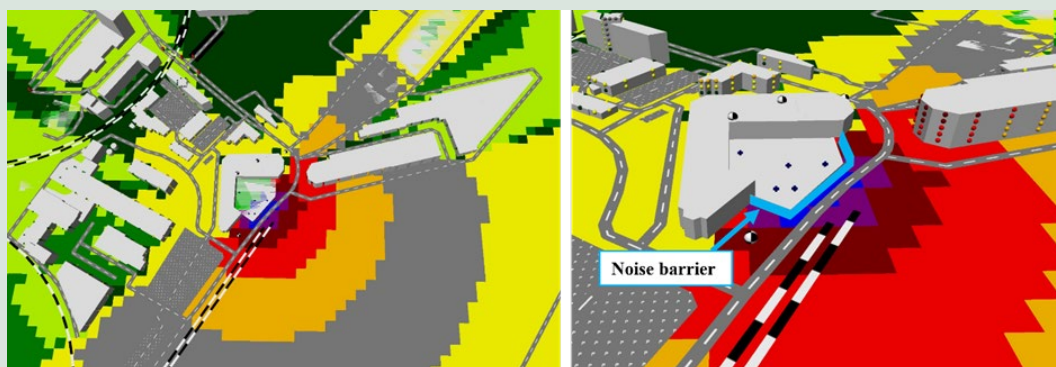
FIGUR 55. De støjkort, der er forberedt for bevægelsesvejen.

Resultaterne af støjkortet, vist i FIGUR 58, viser, hvordan den tilbageværende del af den gamle struktur fungerer som en naturlig barriere for at forhindre støj i at sprede sig over det omkringliggende indre byområde i Aarhus.



FIGUR 56. De støj kort, der er udarbejdet for bevægelsesvejen vist i FIGUR 53.

Som set i FIGUR 57 reducerer placeringen af en støjbarriere betydeligt det område, der udsættes for højere støjniveauer. En yderligere beregning for at optimere højden af barriererne, mulig sikker installation og omkostningseffektiviteten af dette forslag skal overvejes mere detaljeret.



FIGUR 57. Støj kort efter installation af en 3 meter høj støjbarriere (venstre billede); 3D-visning af støjbarrieren (højre billede).

Bilag 1. Forretningsanalyser

Bilag 1.1 Implementering og drift af et sensornetværk på byggeplads

Fakta

Hvad er titlen på casen?

Implementering og drift af et sensornetværk på byggeplads

Hvem har udført og deltaget i casen?

Teknologisk Institut, Aarsleff & DevLabs

Hvor blev casen udført

Casen blev udført i forbindelse af MUDP fyrtårnsprojektet Fremtidens Grønne Byggeplads, og tog sit udgangspunkt i optimering af det indledende anlægsarbejde på byggepladsen Mindet 6 i Aarhus.

Case beskrivelse

Bygherrer, bæredygtighedscertificering og myndigheder stiller i stadig stigende grad krav til grønne tiltag på byggepladsen, og den dertilhørende dokumentation af disse. Et sensornetværk er derfor implementeret på byggepladsen til dokumentation og monitorering af fine partikler (PM_{2,5}), støj og CO₂ i skurbyen. Muligheden for monitorering af vind, regn, NO₂ fra entreprenørmaskinerne og Ozon er blevet undersøgt, men er ikke blevet integreret i dette projekt. Driften af sensornetværket har løbet fra marts 2022 til maj 2024.

Formålet med casen er at opsætte og drifte et modulært sensornetværk, der kan skabe et videns- og erfaringsgrundlag for entreprenøren i fremtidige projekter. Den viden og det erfaringsgrundlag kan – alt andet lige – føre til at den bydende part vinder tilbudssager og til at den bydende part er compliant med myndigheds- og bæredygtighedscertificeringskrav. Derudover kan disse data forbedre beslutningsprocesserne til gavn for kollegaerne på byggepladsen og de tilstødende naboer til byggepladsens sundhed, gennem en reduktion af støj og støvdannelse og eksponeringen af denne, hvilket kvalificerer dialogerne og nødvendige tiltag med alle parter.

Følgende analyse har til formål at beskrive erfaringerne, der er blevet gjort ved implementering og drift af et sensornetværk på byggepladsen. Derudover sammenholdes de sociale, miljø- og klimamæssige og ledelsesmæssige effekter med de økonomiske omkostninger forbundet med casen.

Case resultater

Resultaterne fra casen viser, at det har været muligt at opsætte og drifte et fuldt sensornetværk på byggepladsen. Det har været muligt at opsamle data, der kan bruges til at evaluere effekten af forskellige konkrete tiltag på byggepladsen.

Der har været 20 strategisk placerede sensorer, der har målt i alle faser af det indledende anlægsarbejde. I realtid har det været muligt at følge den aktuelle situation direkte på byggepladsen og hjemme på kontorerne.

Med baggrundssensorer har det konkret været muligt at undersøge, hvor de udledte partikler kommer fra. Produceres de på pladsen eller i det omkringliggende bymiljø.

Derudover viser resultaterne at en strategisk planlægning og præcis uddelegering af ansvar er fundamental for at sikre en effektiv drift af sensornetværket, præcis dataindsamling og den efterfølgende anvendelse af data har også betydning for resultaterne og dermed for værdiskabelsen af målingerne.

Hvilke udfordringer har der været ved gennemførsel af casen

Byggepladser er dynamiske arbejdspladser og kræver derfor et sensornetværket, der er justerbart, robust og flytbart. Løbende i projektet er erfaringerne med sensornetværket blevet noteret, herunder de udfordringer, som projektet er stødt på, og hvordan det forebygges at disse udfordringer opstår.

Hvilke kompetencer/ressourcer er en forudsætning for at gennemføre casen?

Følgende processer er vurderet vigtige i arbejdet med et sensornetværket, og relevante ressourcer skal inddrages heri.

Lavpraktisk drift af sensornetværk:

- Installation og placering af sensorer.
- Sikre strøm til sensorer.
- Flytning og udskiftning af sensorer.

Datavisualisering og dataovervågning:

- Dataanalyse.
- Datavisualisering og dataformidling.

Datakvalitet og sensorpådelighed:

- Opretholde pålideligheden og nøjagtigheden af data.
- Kvalitetssikring og kontrol.

Det er vigtigt at formålet med sensornetværket og de målepunkter man ønsker at monitorere beskrives fra projektets start og implementeres i den klassiske byggepladsindretning og logistik på byggepladsen. Installation og vedligeholdelse af sensornetværk kan tilkøbes hos DevLabs. Gennemgang af data samt sikring af korrekt rapportering af tal og udarbejdelse af rapporter med indsigt og anbefalinger til handlinger kan tilkøbes af DevLabs eller Teknologisk Institut.

ESG værdiskabelse

(E) Hvad er den miljø- og klimamæssige effekt af det implementerede tiltag?

PM2.5 partikler er blevet kædet direkte sammen med for tidlig død. Derudover medvirker PM2.5 partikler til forandring af klima og økosystemer gennem partikel indtag på land og vand⁹.

En stor mængde drikkevand bruges til at støvbekæmpe byggepladser. Måling af støvniveauet på byggepladsen kan hjælpe med at identificere hvornår støvbekæmpelse er nødvendigt, og hermed potentielt spare på vandforbruget. Se forretningsanalysen for CMA for yderligere information.

(S) Hvad er den sociale effekt af det implementerede tiltag?

Partikler og støj på byggepladser udsætter medarbejderne for en arbejdsmiljøbelastning og potentiel varig skade¹⁰. Derudover kan partikler og støj være til væsentlig gene for naboer til byggepladsen. Et sensornetværk kan monitorere niveauerne af partikler og støj, og kan som eksempel give de ansvarlige på byggepladsen en notifikation når grænseværdier overskrides.

Et for højt CO₂ niveau i skurvognene er en kilde til hovedpine, koncentrationsbesvær og træthed¹¹. Monitorering af CO₂ niveau i skurvognene, kan bidrage med at identificere behovet for udluftning ved åbning af vinduer eller i forbindelse med automatisk styring af ventilation.

(G) Hvad er den ledelsesmæssige effekt af det implementerede tiltag?

Et sensornetværk kan bidrage med at træffe ledelsesmæssige beslutninger, der er i tråd med den planlagte strategi og de målsætninger man har for projektet, på et dokumenteret datagrundlag. Data giver mulighed for at sammenligne processer, så der arbejdes med mindst mulig påvirkning af omgivelserne. Det gør det muligt at sætte ind, når der er for mange partikler i luften - et for højt støvniveau på pladsen eller et for højt CO₂-niveau i skurvognene.

⁹ <https://ww2.arb.ca.gov/resources/inhalable-particulate-matter-and-health> (12-04-2024)

¹⁰ <https://bfa-ba.dk/wp-content/uploads/2019/05/haandbogen-2020-print.pdf> (12-04-2024)

¹¹ <https://www.bolius.dk/saa-meget-betyder-en-aaben-doer-for-indeklimaet-45300> (12-04-2024)

Omkostninger

Hvad er de forventede økonomiske omkostninger forbundet med casen?

TABEL 21. Omkostninger (standardpriser).

	Fra	Til
Pris pr. enhed (afhængigt af antallet og hvilken slags sensorer der bruges i enheden).	4900 DKK	15 000 DKK
Månedligt abonnement pr. enhed for dataplatformen, vedligeholdelse af den og dataoverførsel.		149 DKK/måned
Leje (inklusive SIM-dataabonnement og dataadgang, minimumsvarighed på 4 måneder).		1460 DKK /måned
Tilsluttede energimonitorer. Afhængigt af typen og konfigurationen.	1500 DKK	3500 DKK
Udviklingstimer til ekstra funktioner anmodet af kunder.		650 DKK/t
Installation af netværk eller nedtagning. Installation tager fra et halvt døgn til en hel dag, afhængigt af antallet af sensorer. Nedtagning tager fra 1 time til et flere timer, igen afhængigt af antallet af sensorer.		550 DKK/t

Ovenstående priser er standardpriser fra DevLabs. De kan reduceres, hvis volumenerne er højere.

Hvis DevLabs har en serviceaftale for installation og vedligeholdelse af sensornetværk, gennemgang af data, sikring af korrekt rapportering af tal og udarbejdelse af rapporter med indsigt og anbefalinger til handlinger, kan alle de nævnte priser reduceres markant. I dette scenarie ville DevLabs påtage sig al ansvar. Her skal kunden angive hvor sensorerne skal installeres, og hvilke parametre der skal overvåges. Alt andet vil DevLabs tage hånd om.

Refleksioner

Hvilke erfaringer eller eksisterende indsatser kan man bygge videre på? Synergier med andre indsatser?

Efter anlægsarbejdet opstartes arbejdet på råhuset. Her kan man med fordel fortsætte med monitoreringen af valgte måleparametre. Det er oplagt at fortsætte med partikler og støj målinger, men også tilføje parametre som f.eks. NO_x. Det er særligt relevant hvis dieseldrevne maskiner fortsat kører indendørs, påvirkningen fra NO_x i og omkring maskinen.

De valgte måleparametre i den konkrete case er ikke definitive. Nye måleparametre kan tilføjes specifikt til projekter.

Her kan man med fordel kigge ind i vind- og regnmålinger, dels for at kunne dokumentere vejrlig, men også indstille og genoptage arbejdet i kraner. Sidstnævnte har også økonomiske fordele.

Hvordan vil casen se ud for en mindre eller større byggeplads?

Et modulært sensornetværk kan i sagens karakter tilpasses til alle byggepladser. For de enkelte projekter er det muligt selv at definere de måleparametre, som man ønsker at undersøge. De specifikke sensorer kan aftales med leverandør. Vær opmærksom på nødvendigheden af baggrundssensorer, for datakvalitet.

Hvilket marked kigger vi ind i og hvad er fremtidsudsigterne for brugen af sensornetværk på byggepladser?

Bygherrer, bæredygtighedscertificering og myndigheder stiller stadig større krav til dokumentation af klima-, miljø- og arbejdsmiljøtiltag. Et sensornetværk kan være med til at understøtte dokumentationen. I fremtiden kan etablering af et sensornetværk på byggepladser være med til at vinde udbud.

Udfordringer og løsninger ved opsætning og drift af et komplet sensornetværk på byggepladsen, Mindet 6

Integreringen af sensorer på en byggeplads repræsenterer et betydeligt skridt fremad inden for byggeledelse og miljøovervågning. Byggepladsens dynamiske karakter, med dens unikke udfordringer, kræver robust og tilpasningsdygtig sensorteknologi. Målet er at levere handlingsrettet indsigt for beslutningstagere, så sensordata effektivt bidrager til mere informerede, effektive og sikrere byggepraksisser.

TABEL 22. Udfordringer og løsninger ved opsætning og drift af et komplet sensornetværk på byggepladsen, Mindet 6.

Udfordringer	Løsninger
Strømkabler bliver ofte afbrudt eller klippet over på grund af uheld eller flyttede hegn mm.	1. Vælg placeringer til sensorer (hvis muligt), der vil være permanente og ikke vil ændre sig under byggeprocessen. 2. Hvis det ikke er muligt med punkt 1, så brug MOBILE sensorer med et solcelle-modul.
Sensorer bliver flyttet uden tilbagemelding om dette, fordi de forstyrrer byggeprocessen.	De nye modeller af sensorer har en aktiv GPS-tracker, der viser dens placering på et kort. Brug informationskilt/mærkat på enheden med kontaktoplysninger til den ansvarlige person.
Historiske data om sensorernes positioner skal registreres for at vide om de ændrer deres placering i løbet af byggeprojektet.	Den nye GPS-tracker kan kortlægge de historiske placeringer af enheden.
GPS-sensorer ændrer deres position med få minutters mellemrum.	Positionsskiftet er inden for en radius på 3-5 meter, da placeringen opdateres hvert minut. Denne lokalisering kan stabiliseres ved at beregne gennemsnittet af placeringen i længere perioder, f.eks. få timer eller 1 dag. ELLER hvis vi kender den præcise sensorposition, kan vi fastkode koordinaterne på et kort.
Usikkerhed om, hvorvidt anemometre (vindmålere) er vendt i den rigtige retning.	Nogle anemometre kan automatisk orientere sig mod nord. Disse kan bruges som et alternativ til de anemometre der skal orienteres manuelt. De automatiske er dyrere.

Udfordringer	Løsninger
Vedligeholdelse af sensorerne kan være tidskrævende (af sikkerhedsmæssige årsager kan der være behov for at informere ansvarlige på stedet på forhånd) og dyrt (hvis indgreb af en professionel elektriker er nødvendig).	De nye generationsenheder er mere robuste og kræver mindre vedligehold. I planlægningsfasen er det vigtigt at tildele ansvaret for fejlfinding. Derudover er det også vigtigt at placere sensorerne på en let tilgængelig position (endnu bedre uden for byggepladsen, hvis den ansvarlige person ikke altid er på stedet eller ikke har tilladelse til at komme ind). Alternativt kan man have et tredjepartsteam, der kan tage sig af systemet/sensorerne og vedligeholdelsen af det. Den nye generation af enheder bruger almindelige stik, der kan håndteres af enhver person. Det begrænser behovet for en professionel elektriker til kun at være nødvendig i begyndelsen af projektet for at bringe strøm til de områder, hvor sensorer vil blive installeret. (Med mindre solmoduler bruges, så er det ikke nødvendigt).

Læringer om sensornetværk på byggeplads

Strategisk planlægning og den delegering af ansvar er afgørende for optimal drift af sensornetværk. Det at sikre en operationel effektivitet, præcis dataindsamling og en effektiv anvendelse af data er essentielt. Denne tilgang letter forbedrede beslutningsprocesser til gavn for personale på stedet, de tilstødende naboer og den overordnede drift.

TABEL 23. Læringer om sensornetværk på byggeplads.

1	Lokal regn kan forstyrre målingerne uden at påvirke baggrunden. Hvis baggrundssensorerne er placeret langt væk (1 km eller mere), kan der være tilfælde, hvor det regner på byggepladsen, men ikke ved baggrundssensoren. Regn kan påvirke partikelmålinger og skabe uoverensstemmelser med baggrundssensoren og lidt forvirring, hvis der ikke er nedbør ved baggrundssensoren. Derfor bør en baggrundssensor installeres ikke alt for langt væk fra byggepladsen, så den fanger de fleste af sådanne tilfælde. Desuden ville en regn/fugtighedssensor på stedet være relevant til yderligere dokumentation af regn hændelser og ekstreme vejrbegebenheder, der forstyrrer det planlagte arbejde. Dermed kan det dokumenteres at forsinkelser i byggeprocessen skyldtes vejret.
2	Det er blevet nævnt flere gange, at vibrationer i jorden kunne være et relevant parameter at måle på. Den ekstra sensor til vibrationer kan købes og tilsluttes systemet.
3	Sensorerne har været offline i flere uger. Vi (DevLabs) kan opsætte automatiske advarsler, der efter et par timer eller en gang dagligt, sendes pr. mail eller SMS. Det vigtige er at sende det til den rette person, der kan handle øjeblikkeligt. Dette skal være en del af planlægningsprocessen at tildele de korrekte personer de korrekte opgaver.
4	Relevant data skal præsenteres enkelt og forståeligt for målgruppen. Planlægningsprocessen bør forventningerne afstemmes med slutbrugerne. Fra et teknisk perspektiv er vi (DevLabs) i stand til at imødekomme og oprette forskellige dashboards til forskellige slutbrugere. Disse dashboards kan variere i kompleksitet og den måde, de kan tilgås på. For eksempel via en hjemmeside, telefon, tablet eller en QR-kode.

5	Stærke elektromagnetiske felter kan påvirke sensormålinger (selvom vi ikke har observeret dette under projektet). Som en forholdsregel kan det være en god idé at sikre, at store elektriske enheder (f.eks. transformatorer og ladestationer) ikke placeres i umiddelbar nærhed af sensorerne.
6	Vi har lært, at strømforbrugsmålinger for forskellige aktiver som skurvogne, belysning, ladestationer bliver et fokuspunkt på byggepladsen. Herunder hvor meget strøm der trækkes, fordi overdreven strømtrækning kan nogle gange forårsager strømafbrydelser, og det kan være dyrt at rette op på, og det forårsager også forsinkelser. Vi har nu udviklet et plug-in måler, der passer til almindelige el tavler, der kan overvåge hvert aktiv separat i realtid og vise samlet forbrug og strømtræk. Derudover er der muligheder for fjernafbrydelse. For eksempel, hvis nogen glemmer at slukke lyset, eller det skal slukkes på et bestemt tidspunkt, kunne det arrangeres, at strømmen ville blive afbrudt automatisk ved vores målere eller via dashboardet af en tilsynsførende.
7	Målinger er vigtige, ikke kun udenfor, men også når arbejdet bevæger sig ind i bygningen. Her kan det endda være endnu vigtigere at måle forskellige parametre relateret til arbejdssikkerhed og medarbejdernes sundhed. I et indendørs miljø er der en øget risiko for eksponering for høje niveauer af støj, støv eller endda nogle farlige gasser under svejseprocessen. Sensorer, der kunne overvåge disse parametre, kunne være meget nyttige for arbejds- og sikkerhedsrepræsentanter, der herved får muligheden for at handle på reelle data.
8	I visse perioder kan de gennemsnitlige emissioner fra byggepladsen være lavere end baggrundsniveauet for forurening. Dette kan delvist skyldes at byggepladsen Mindet 6 specifikationer lå ved kysten, hvor vinde kan blæse partikler og andre gasser væk. Der kan også være mindre biltrafik i området. Derfor er der behov for en baggrundssensor til at kunne skelne mellem en byggeplads' forurening og den generelle forurening i området. Den bør placeres i et område inden for 1-5 kilometer. Området bør være væk fra lokale emissionskilder (højintensive veje, industri, brændovne fra alm. hjem).
9	Sensorer kan blive beskadiget af vandindtrængning, hvis de ikke er korrekt installeret eller opbevaret. (For eksempel lå en stang ned med en sensor, og resultatet var en ødelagt sensor). For at omgå dette er der brug for mere tydelige installationsinstruktioner og vejledning om, hvordan man håndterer sensorerne. Hvis sensorerne også håndteres af en dedikeret tredjepartsleverandør, vil sandsynligheden for sådan en begivenhed falde markant, og hvis der sker noget, vil det være leverandørens ansvar.
10	Den kemiske sammensætning af støvet på byggepladsen kan være anderledes end det urbane støv. Sensorer kalibreres normalt mod urbant støv, hvilket gør målingerne mindre nøjagtige. Når man bruger optiske partikelsensorer, tæller de partikler, som de "ser" dem, men de ved ikke, om det er cement, pollen, asbest eller enhver anden sammensætning af partiklen. I nogle tilfælde kan det undervurdere den samlede mængde mg/m^3, i andre tilfælde overvurdere den. For at imødegå dette kræves en grundig kalibrering af sensorerne. Vælg hvis det er muligt, enheder specielt er udviklet til brug på byggepladser, der anvender kalibreringskoefficienter og kan korrigere disse udfordringer. Vores sensorer, der anvendes i dette projekt, kan justeres for at imødekomme dette. En anden mulighed er at bruge specialiserede sensorer, der er nøjagtige, men samtidig meget dyre. Det vil ikke være en økonomisk fordelagtig mulighed på byggeprojekter.

11	I andre projekter har vi lært, at lydniveau-målinger kan være ekstremt vigtige, især i bymiljøer med strenge kommunale retningslinjer for støjniveauer. Vi har en byggeplads i Københavns centrum, hvor pladschefen får advarsler, når støjgrænserne på pladsen overskrides, og kan træffe beslutninger for at rette det på baggrund af dette. De er meget glade for dette system, da deres byggeplads ligger tæt på højt profilerede naboer. Så at holde støjen inden for retningslinjerne er meget vigtigt for dem. Desuden, hvis der skulle komme klager, er alle målinger dokumenteret, og det kan undersøges, om støjniveauerne faktisk var over grænserne eller ej.
12	Vindsensorer kan være nyttige ikke kun til at vide hvor forurening kommer fra, og hvor den går hen, men også for arbejdssikkerheden. Hvis vindhastigheden bliver for høj, kan der sendes advarsler for at få folk, der arbejder i højderne, ned eller stoppe kranarbejdet.
13	Støvbekæmpelsesaktiviteter i varme perioder kan overvåges ved at måle støjniveauer. På denne måde kan tid og penge spares på vand/støvopløsning ved kun at anvende det, når det er nødvendigt.
14	Hvis der anvendes 'electrochemical' gassensorer, bør de udskiftes hver 2. år, afhængigt af sensoren. En udskiftning kan koste mellem 100-200 euro. Optiske sensorer som dem til støv eller CO₂ kan fungere i 5 år uden behov for vedligeholdelse.
15	For at opretholde pålideligheden og nøjagtigheden af dataene er det afgørende at etablere kvalitetssikrings- og kvalitetskontrol. Tildel ressourcer i budgettet til indkøb, installation, kvalitetskontrol af data og dataanalyse samt vedligeholdelse af sensornetværket. Sørg for, at der er en bestemt person med relevant viden i organisationen, der er ansvarlig for dette. Eller outsource aktiviteten til en tredjeparts-leverandør.
16	Sensornetværker til overvågning af forurening, vibrationer og energiforbrug kan have stor indflydelse på ESG-rapportering og overholdelse af myndigheds- og bygherrekrav. Governance og beslutningstagning kan baseres på faktiske data. Derudover kan CSR bidrage til at opretholde gode relationer med omkringliggende samfund.

Bilag 1.2 Støvbekæmpelse med DUST-AWAY, der består af CMA (Calcium Magnesium Acetate)

Fakta

Hvad er titlen på casen?

Støvbekæmpelse med DUST-AWAY, der består af CMA (Calcium Magnesium Acetate)
Produktet DUST-AWAY vil fremover i denne case blive omtalt som CMA.

Hvem har udført og deltaget i casen?

Aarsleff, Teknologisk Institut, Alumichem, DevLabs.

Virksomheden Photocat A/S har de kommercielle rettigheder til DUST-AWAY¹²

Hvor blev casen udført

Casen blev udført i forbindelse af MUDP fyrtårnsprojektet Fremtidens Grønne Byggeplads, og tog sit udgangspunkt i optimering af det indledende anlægsarbejde på byggepladsen Mindet 6 i Aarhus.

Case beskrivelse

Støv skal bekæmpes, da det er sundhedsskadeligt og til gene for byggepladsens medarbejdere og for naboer til byggepladsen. På nuværende tidspunkt efterspørger byggepladsarbejderne støvbekæmpelse, når der opleves gener, eller hvis støv visuelt kan observeres. Efterfølgende spredes vand for at dæmpe støvproduktionen.

CMA er et alternativ til støvbekæmpelse med vand. CMA binder sig til løst materiale, hvilket betyder, at der skal støvbekæmpes færre gange på byggepladsen.

En støvbekæmpelseskampagne, der anvender CMA, blev udført i start maj 2023 samt slut august til start september 2023¹³.

Følgende forretningsanalyse har til formål at vurdere relevansen af CMA som et alternativ til spredning af vand. Vurderingen vil ske på baggrund af en cost-benefit-analyse, hvor de sociale, miljø- og klimamæssige og ledelsesmæssige effekter sammenholdes med de økonomiske omkostninger forbundet med casen.

Case resultater

Kvantitative resultater

Grundet udfordringer under støvbekæmpelseskampagnen kan partikeldata målt på byggepladsen ikke bruges til at drage konklusioner, om hvorvidt CMA medfører en reduktion i støv på byggepladsen.

Et testprojekt udført af Photocat A/S udenfor rammerne af projektet fremtidens grønne byggeplads, viser umiddelbart en reduktion af støv på mellem 20-35% over en periode på ca. 7 dage¹⁴.

Kvalitative resultater

Et interview med to medarbejdere på byggepladsen indikerede, at støvbekæmpelse med CMA umiddelbart havde en effekt på op til 2 dage i sol og 4-5 dage i skygge, hvor der ved bekæmpelse med vand umiddelbart skulle bekæmpes hhv. 3 gange dagligt i sol og 1 gang dagligt i skyggen¹⁵.

Hvilke udfordringer har der været ved gennemførsel af casen

- Generelt lave partikelniveauer på byggepladsen

¹² <https://www.photocat.net/> (27.02.24)

¹³ Afsnit 7.2 om støvbekæmpelseskampagnen

¹⁴ Photocats egen analyse (mail til Henrik er sendt)

¹⁵ Bilag 1.2.1 - Interview med Brian Nykjær Larsen ang. Fremtidens Grønne Byggeplads

- Ved støvbekæmpelseskampagnen fra august til september var der lagt asfalt på kørevejen
- CMA blev anvendt i for lille en dosis på byggepladsen
- Vejrlig
- Uvidenskabelig evaluering af effekten af de forskellige tilgange til støvbekæmpelse

Hvilke kompetencer/ressourcer er en forudsætning for at gennemføre casen?

Spredning af CMA på byggepladsen forudsætter ingen yderligere kompetencer eller ressourcer. Spredningen af CMA foregår på samme måde som ved spredning af vand.

CMA skal dog købes og leveres til byggepladsen. Et mindre lager kan derfor være nødvendigt.

ESG værdiskabelse

(E) Hvad er den miljø- og klimamæssige effekt af det implementerede tiltag?

Reduktion af vandforbrug

På en varm sommerdag bruges 6000 liter vand til støvbekæmpelse på to dage¹⁶. CMA består af kalk, magnesium og eddikesyre, hvor sidstnævnte udgør størstedelen.

I udførelsesfasen reduceres forbruget af vand ved at støvbekæmpe med CMA. Hertil skal det dog præciseres, at vi ikke på nuværende tidspunkt kender til vandforbruget i selve produktionen af CMA. Der kunne potentielt være store mængder vand forbundet med udvindingen af kalk og magnesium eller i produktionen af eddikesyre. Disse forbrug kender vi dog ikke, men det skal være et opmærksomhedspunkt.

Reduktion af dieselforbrug

Ved at skulle støvbekæmpe færre gange på byggepladsen reducerer man - alt andet lige - også antallet af kørte km. Det kan give en besparelse på dieselforbruget.

Det er ukendt om CMA har miljø- og klimamæssige omkostninger

CMA er fremstillet af hvedekorn, som i en gæringsproces bliver omdannet til eddikesyre og som efterfølgende bliver neutraliseret til en flydende klar væske, medkalk og magnesium. Alle ingredienserne er umiddelbart ufarlige for miljøet. Derudover er CMA'en svanemærket. Udvinning af kalk og magnesium har for Photocat A/S ukendte omkostninger for miljøet og klimaet i de tidligere faser af råmaterialerne levetid. Eddikesyre er et restprodukt, man skal derfor være opmærksom på den potentielle rebound effekt¹⁷ der kan skabes ved brug af CMA.

(S) Hvad er den sociale effekt af det implementerede tiltag?

Støvbekæmpelse

"I sol virkede det [CMA] max 2 dage og uden sol max 4-5 dage i skygge. Hvis man brugte det på stabilgrus, og virkelig gennemvædede, kan det være man kunne bruge det i flere dage. Men så skal der være rigelige mængder. Kunne godt se, at man kunne bruge det. Hvis man fik lov at bruge det på løst materiale. Det fungerer ikke med asfalt." 15.11.23 - Interview med Brian Nykjær Larsen, Formand på jordarbejde, Aarsleff med input fra Jane Dahl Larsen⁶

(G) Hvad er den ledelsesmæssige effekt af det implementerede tiltag?

Projektledelsesmæssigt giver adgangen til CMA, og viden om hvordan den håndteres, et alternativ til vand. Vand er en begrænset ressource.

¹⁶ Bilag 1.2.1 - Interview med Brian Nykjær Larsen ang. Fremtidens Grønne Byggeplads

¹⁷ Øget forbrug af CMA kan skabe en øget produktion af hvede, hvilket optager land der kan rejses skov på.

Omkostninger

Hvad er de forventede økonomiske omkostninger forbundet med casen?

Til denne forretningsanalyse er der blevet udarbejdet en cost-analyse af Photocat A/S. Den kan findes i **Bilag 1.2.2**. Excel-arket kan bruges til beregning af månedlige omkostninger ved spredning af CMA sammenlignet med spredning af vand. Vær opmærksom på at tallene i beregneren kommer fra Photocat A/S og ikke fra projektet. I beregneren er det muligt at indtaste data selv, hvis projektspecifikke data er tilgængelige. Se beregningseksempel i **Bilag 1.2.2**.

Refleksioner

Hvilke erfaringer eller eksisterende indsatser kan man bygge videre på? Synergier med andre indsatser?

Støvsensorerne er en del af et større sensornetværk. Hele netværket af sensorer kan bruges til at give alarmer når niveauet for de pågældende variabler bliver for højt. Herefter vil man kunne rykke ud og f.eks. støvbekæmpe med det samme grænseværdien overskrides. Til at starte med vil sensornetværket være fordelagtigt på større byggepladser. I fremtiden vil dette dog skulle udrulles på alle byggepladser.

Hvordan ville forretningspotentialet se ud for en mindre eller større byggeplads?

Cost-regnearket i **Bilag 1.2.2** kan tilpasses størrelse på byggeplads. ESG-effekterne vil ikke ændre sig på andre typer af byggepladser.

Hvilket marked kigger vi ind i og hvad er fremtidsudsigterne for brugen af CMA?

De sundhedsmæssige aspekter af byggepladsdrift har traditionelt været højt prioriteret.

Fremtidens vejrforhold bliver mere ekstreme. Længere perioder med tørke¹⁸, hvor det vil være nødvendigt at støvbekæmpe konstant. Modsat tørke, vil der ligeledes komme voldsommere og længere perioder med regn, hvor det ikke vil være nødvendigt at støvbekæmpe.

Bilag 1.2.1 Interview

15.11.23: Interview med Brian Nykjær Larsen, Formand på jordarbejde, Aarsleff med input fra Jane Dahl Larsen

Interviewere: Naja Villadsen, Konsulent, Miljøteknologi, Teknologisk Institut og Ditte Lyng Rosenquist, projektleder og bæredygtighedsspecialist, Aarsleff

Hvordan påvirker støv på byggepladsen?

Det er et stort irritationsmoment for medarbejderne på byggepladsen. Støvet påvirker ikke selve byggeriet, men det er et dagligt problem, hvis man ikke får vandet. Det påvirker også omgivelserne.

På en varm sommerdag vil man vande cirka 2-3 gange om dagen, og bruge 1000 liter per gang. Det tager ca. 1 time per gang.

Hvorfor blev der lagt asfalt?

Det blev lagt for at holde byggepladsen bedre. For lettere at kunne vedligeholde. Også i forhold til støv.

Man kunne godt få kost med vand på en gummiged, men det vil ikke være optimalt. Man har prøvet det, men det er ikke den store succes

Hvordan beslutter I, hvornår der skal støvbekæmpes?

¹⁸ <https://miljotilstand.dk/klimaforandringer/toerke-og-klimaforandringer> (12.08.24)

Det er en vurderingssag, når man er på byggepladsen. Det er tydeligt at se. Man kan sagtens se støvskyer, når man går. Men der er også folk, der siger til, når det bliver for meget.

Hvordan er det gået med CMA spredningen?

Det virkede okay, men ikke i den periode man sagde. I sol virkede det max 2 dage og uden sol max 4-5 dage i skygge. Hvis man brugte det på stabil, og virkelig gennemvædede, kan det være man kunne bruge det i flere dage. Men så skal der være rigelige mængder. Kunne godt se, at man kunne bruge det. Hvis man fik lov at bruge det på løst materiale. Det fungerer ikke med asfalt.

Hvordan har I brugt sensornetværket?

Vi er ikke blevet introduceret til sensormålinger. Vi har kigget meget lidt på det, men synes at målingerne lignede det der blev mål ved sensorer længere fra byggepladsen. Dataindsamlingen er foregået i baggrunden og ikke noget man har forholdt sig til det. De kunne måske have brugt det.

Skete der noget omkring d. 20-22 september, for målingerne viser, at der var rigtig meget støv?

Det kan jeg ikke huske, men jeg vil gerne se om jeg kan gå tilbage og se, om vi lavede noget anderledes de dage

Vil I kunne bruge sensormålinger på byggepladsen?

Sensorer for støj vil være rigtig godt. Vi har målinger på vibrationer på selv, der sidder på bygningen. Det vil være godt at kunne måle vind, nedbør, temperatur, støj, støv. Det er særligt vigtigt med vejr i forhold til at bedømme vejrligsdage.

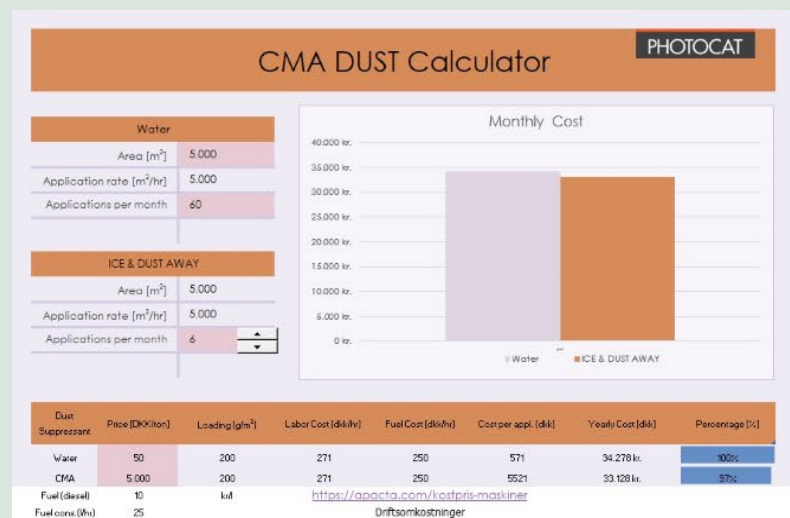
Hvordan kan støvmåling fortælle noget om anvendelsen af støvbindere, afdækning af materialer, luftrensning, etablering af vindbeskyttelse og beskyttelsesudstyr til de timelønnede?

Det er vigtigt, at det er realtime og at man for eksempel får en alarm hvis det er for højt. Så kan det give en værdi og man kunne rykke på det.

Kan vi bruge viden om støv ift. vores maskiner og udstyr – fx reducere ophobning af støv i maskiner og udstyr.

Hør Bo Mikkelsen (red. Maskinchef hos Aarsleff). Vi kan ikke fortælle noget om konsekvenserne for maskinerne, men de burde være ret solide og de har forskellige filtre.

Bilag 1.2.2 CMA calculator med beregningseksempel



I dette beregningseksempel er der taget udgangspunkt i en byggeplads med et tilsvarende areal som Mindet 6. Det tager en time at bekæmpe hele arealet med både vand og CMA. På en måned antages det er fuld sol og at der dermed skal bekæmpes 3 gange dagligt med vand, hvor CMA'en kan holde i 2 dage. Prisen på CMA er givet af Photocat A/S og er med mængderabat. Loading er angivet ud fra erfaring med støvbekæmpelseskampagnene, hvor der blev spredt 1 ton pr til de 2700 m².

Begreb	Begrebstforklaring	Enhed
Area	Aralet hvorpå der skal spredes vand eller CMA	m ²
Application rate	Hvor meget areal kan der spredes vand eller CMA på på en time.	m ² /time
Applications per month	Hvor mange gange bekæmpes der om måneden. Indtastes 44 svarer dette til ca. 2 støvbekæmpelser om dagen. Indtastes 10 svarer det til bekæmpelse hver 3 dag.	
Price	Prisen for 1 ton vand eller CMA	DKK
Loading	Hvor mange gram vand eller CMA spredes der pr. m ² . 370 svarer til at 1 ton spredes på et 2700 m ² areal. Loading har stor indflydelse på den samlede omkostning af CMA, da prisen på netop denne er så høj ift. vand.	g/m ²
Labor Cost	Time prisen for medarbejder	DKK/time
Fuel Cost	Brændstof omkostninger	DKK
Cost per application	En samlet opgørelse for hvad det koster for 1 påføring af vand eller CMA.	DKK
Monthly Cost	Månedlige omkostninger	DKK

FIGUR 58. CMA calculator med beregningseksempel.

Bilag 1.3 Reduktion af energiforbrug og energitab ved brug af moderne skurmoduler

Fakta

Hvad er titlen på casen?

Reduktion af energiforbrug og energitab ved brug af moderne skurmoduler

Hvem har udført og deltaget i casen?

Aarsleff, Teknologisk Institut, Zeppelin Rental (tidligere CP)

Hvor blev casen udført

Casen blev udført i forbindelse af MUDP fyrtårnsprojektet Fremtidens Grønne Byggeplads, og tog sit udgangspunkt i optimering af det indledende anlægsarbejde på byggepladsen Mindet 6 i Aarhus. Aarsleff byggepladsen på ARoS THE NEXT LEVEL har bistået med referencemålinger til sammenligning af energiforbrug på andre typer skure.

Case beskrivelse

I takt med et øget fokus på minimering af byggepladsens klimapåvirkning, er det relevant at kigge på energibesparelses-potentialet ved valg af skurmoduler. I forlængelse heraf vil forretningsanalysen derudover også undersøge potentialerne ved egenproduktion af grøn strøm via et solcelleanlæg på toppen af skurmodulerne.

Zeppelin Rental har opsat 6 hybridmoduler på Mindet byggepladsen (3 stk. mandskabsmoduler og 3 stk. kontormoduler). Hybridmodulerne har et øget fokus på at mindske energiforbruget, gennem bl.a. en forbedret klimaskærm, varmepumpe og intelligent LED belysning med bevægelsessensor. Derudover er hybridmodulerne digitaliseret på en måde som muliggør bedre overvågning af energiforbrug og brugeradfærd. For at undersøge den realiserede energieffektivisering på hybridmodulerne, udføres en analyse, hvor energiforbruget på Mindet skurbyen sammenlignes med referencemålinger fra ARoS: THE NEXT LEVEL skurbyen. Sidstnævnte består af Zeppelin Rental's Blue-Line og Green-Line moduler, og der er tale om en lignende konfiguration af antal mandskabs- og kontormoduler. Samtlige målinger i denne case er foretaget i en periode, hvor modulerne er i brug. Ved sammenligning bestræbes der et lignende forbrugsmønster.

På hybridmodulerne er der opsat et SUNCAP solcelleanlæg, der kan producere grøn strøm til skurbyen, byggepladsen og til el-nettet. Casen undersøger hvor stor en andel af hybridmodulerne forbrug, der kan dækkes af solcellerne.

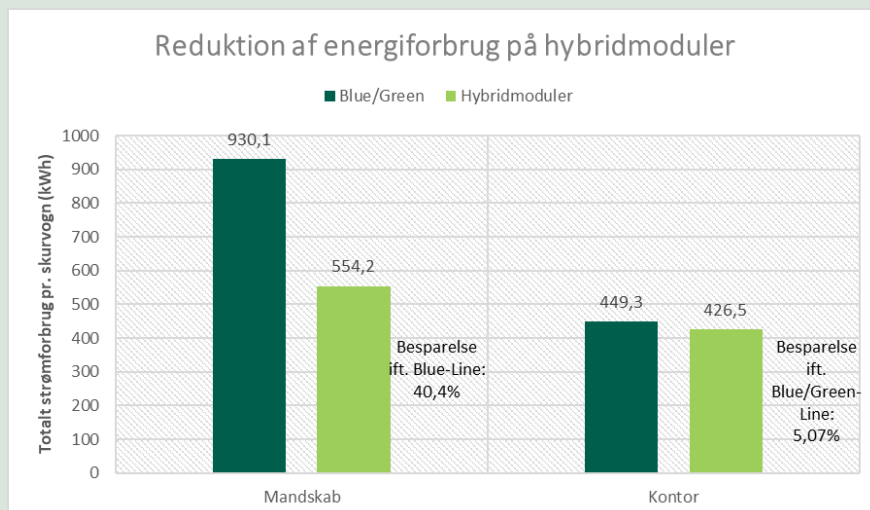
Case resultater

Nedenstående tabel viser det samlede strømforbrug på byggepladsen i 2023. Derudover viser tabellen også strømforbruget for de enkelte typer af moduler i 2023.

TABEL 24. Samlede strømforbrug på byggepladsen i 2023.

	kWh	%
Samlet strømforbrug på byggepladsen i 2023	108.140	100
Samlet strømforbrug for de 6 stk. hybridmoduler	15.140	14
Samlet strømforbrug for 3 stk. hybridmandskabsmoduler	9.192	8,5
Samlet strømforbrug for 3 stk. hybridkontormoduler	5.948	5,5

Nedenstående figur illustrerer det totale energiforbrug normaliseret pr. modul for perioden den 05.03.2024 til 05.05.2024 fordelt på hybridmodulerne, der er installeret på Mindet byggepladsen og Blue- eller Green-Line modulerne fra ARoS THE NEXT LEVEL byggepladsen. Som det ses af figuren, opnår hybridmandskabsmodulerne en energibesparelse på 40,4% ift. Blue-Line mandskabsmodulerne. Hybridkontormodulerne opnår en energibesparelse på 5,1% ift. kontormodulerne, som var en blanding af Blue- og Green-Line.

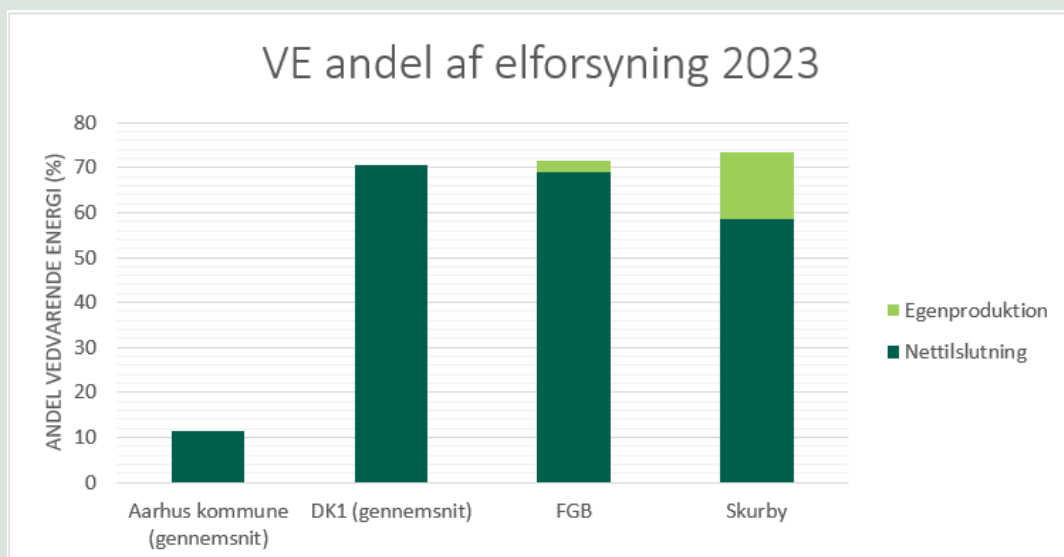


FIGUR 59. Reduktion af energiforbrug på hybridmoduler.

DTU har foretaget en klinisk beregning af det forventede varmetab for skurmodulerne. Resultaterne viste, at hybridmodulet forventes at have ca. 82% bedre energiudnyttelse end Blue Line og ca. 37% bedre end Green Line modulerne. Disse værdier er betydeligt højere end de målte værdier for Mindet og ARoS THE NEXT LEVEL. Forskellen kan skyldes, at referencemålingen er udført på skurbyer i brug, og adfærden har derfor indflydelse på energiforbruget, hvilket kan påvirke sammenligningsgrundlaget.

Nedenstående figur viser andelen af vedvarende energi for forskellige scenarier. For en lokal betragtning af Aarhus kommune udgør vedvarende energi i gennemsnit 11,5% af elforsyningen. Til sammenligning er andelen af vedvarende energi i DK1's elforsyning 70,7%, når import og eksport medregnes og antages at have en vedvarende energi-andel på 0% (hvilket er en konservativ antagelse).

Sammenholdes elproduktionen, import, eksport og forbrug time for time i 2023, kan det ses, at egenproduktion fra solceller dækker 15% af skurbyens forbrug og 2,5% af hele byggepladsens forbrug. Når forbruget medtages, bliver det tydeligt, at nettilslutningen bidrager med en lavere andel af vedvarende energi end gennemsnittet. Dette skyldes, at forbruget ofte ligger i perioder med lavere produktion fra vedvarende energikilder.



FIGUR 60. VE andel af elforsyning 2023.

Hvilke udfordringer har der været ved gennemførelse af casen

I forbindelse med gennemførelse af casen er deltagerne stødt på flere udfordringer. Den primære udfordring har været ustabil tilslutning af solcellerne. Det kræver konstant opmærksomhed på tilslutning af solceller, da ledningerne kan falde ud, blive taget ud eller på anden måde blive frakoblet. Det skyldes at byggepladser er dynamiske arbejdspladser, hvor der flyttes rundt på modulerne og andre tekniske installationer.

Derudover har den gateway, der sender målinger, haft mange nedbrud. En gateway er et elektronisk udstyr, der sender målingerne fra byggepladsen til i sidste ende en computer.

Hvilke kompetencer/ressourcer er en forudsætning for at gennemføre casen?

Følgende processer er vurderet vigtige i arbejdet med en energiovervågning, og relevante ressourcer skal inddrages heri.

Opsætning og lavpraktisk drift

- Det kræver en certificeret elektriker at opsætte el-målere til tavlerne
- Det kræver en certificeret elektriker at tilslutte solcellerne til modulerne

Data

- Ressource og relevante teknologier til dataopsamling
- Ressource til databehandling
- Ressource til datavisualisering og dataformidling

Datakvalitet og sensorpålidelighed

- Kvalitetssikring og kontrol af tilslutninger

Koordinere besøg på byggeplads

ESG værdiskabelse

(E) Hvad er den miljø- og klimamæssige effekt af det implementerede tiltag?

Som beskrevet i case-resultaterne er der en energibesparelse forbundet med valg af modul. Den energibesparelse har en tilsvarende CO₂-reduktion. I dette afsnit vil CO₂-reduktionspotentialet blive præsenteret.

Ved at benytte hybrid-moduler fremfor Blue- eller Green-Line, med de energieffektiviseringer det medfølger, kombineret med egenproduktion af strøm fra et SUNCAP solcelleanlæg. Kan udledningen af CO₂-eq reduceres med samlet set 38%.

Zeppelin Rental har fået udarbejdet en livscyklus screening ¹⁹, der viser en klimamæssig tilbagebetalingstid på 6 år for SUNCAP solcelleanlægget.

(S) Hvad er den sociale effekt af det implementerede tiltag?

-

(G) Hvad er den ledelsesmæssige effekt af det implementerede tiltag?

Med hybridmodulerne kan man på et dokumenteret datagrundlag overvåge energiforbrug og dermed træffe ledelsesmæssige beslutninger, der er i tråd med den lagte strategi for projektet. Med hybridmodulerne kan man se, hvad der bruger strøm, hvornår, og om der bruges for meget strøm. Det gør det muligt at sætte ind, når klimaskærmen brydes ved f.eks. åbne vinduer/døre, eller ved elektronik, der kører unødvendigt meget.

¹⁹ <https://www.cp.dk/kataloger/livscyklus-suncap>

Omkostninger

Hvad er de forventede økonomiske omkostninger forbundet med casen?

TABEL 25. Omkostninger.

Hybridmodul	Green-line kontormodul	Suncap solceller
139,30 kr./dag	115 kr./dag	75 kr./dag

Hybridmoduler har en fast daglig- leje-pris, hvor det med Green-line modulerne er muligt at opnå en procentuel besparelse alt efter kundeforhold.

Refleksioner

Hvilke erfaringer eller eksisterende indsatser kan man bygge videre på? Synergier med andre indsatser?

I problematikken med et højt energiforbrug i modulerne spiller adfærden fra brugerne en stor rolle. Med et intelligent sensornetværk i modulerne, vil man kunne dataopsamle og monitorere energiforbruget. På den baggrund vil man kunne igangsætte indsatser og initiativer til reduktion af energiforbrug. Det kan være sensorer der giver signal hvis der er et højt energiforbrug efter fyraften, eller hvis vinduer efterlades åbne.

Hvordan ville forretningspotentialet se ud for en mindre eller større byggeplads?

Egenproduktion af strøm v. solceller afhænger i høj grad af lokale betingelser. Mindre projekter over vinterhalvåret vil eksempelvis have mindre gavn af den egenproducerede strøm, end projekter der løber i sommermånederne. Derudover spiller placeringen af skurbyen en vigtig rolle. Hvis skurbyen placeres i skygge, er dette en barriere for øget egenproduktion af strøm.

Hvilket marked kigger vi ind i og hvad er fremtidsudsigterne?

Med det opdaterede BR25, kigger vi ind i et marked, hvor der er bliver et større fokus på minimering af byggepladsens klimaaftryk. Her kan forbrugsdata på energi og egenproduktion af strøm, være en driver og en indsats der kan være med til at bidrage til den samlede reduktion.

Bygherre betaler ofte for byggepladsstrøm. Det er derfor vigtigt at gå i dialog med bygherre tidligt i projektet for at afklare eventuelle forhold omkring indkøb af byggepladsstrøm og det løbende forbrug, således at det bliver synligt for den udførende og forbrugende part, hvilke sammenhænge der kan være mellem projektets faser, antallet af medarbejdere i modulerne, kommunikationstiltag mv.

Bilag 1.4 Sammenligning af gravet rende ved ECO mode og Power mode

Fakta

Hvad er titlen på casen?

Sammenligning af gravet rende ved ECO mode og Power mode

Hvem har udført og deltaget i casen?

Teknologisk Institut & Aarsleff

Hvor blev casen udført

Casen blev udført i forbindelse af MUDP fyrtårnsprojektet Fremtidens Grønne Byggeplads, og tog sit udgangspunkt i optimering af det indledende anlægsarbejde på byggepladsen Mindet 6 i Aarhus.

Udførelsesdelen af casen er foretaget i en uforstyrret grusgrav, da tests direkte på byggepladsen kan forstyrres af andre maskiner, samt sikkerhedsmæssige hensyn.

Case beskrivelse

I takt med en øget fokus på minimering af byggepladsens klimapåvirkning, og de kommende grænseværdier for CO₂ udledningen på byggepladsen, er det relevant at undersøge brændstofreducerende tiltag for entreprenørmaskiner. Som en del af Fremtidens Grønne Byggeplads er der blevet foretaget sammenlignelige tests for tre karakteristiske opgaver. Grave og læsse, grave rende og afslutningsvis afretning af flade. Gravemaskinen brugt til tests er en CAT 325F L - Stage IV, på diesel og HVO.

Følgende analyse har til formål at vurdere brændstofforbruget og produktiviteten ved en grave-rende-opgave. Resultaterne vil blive holdt op mod sociale, miljø- og klimamæssige og ledelsesmæssige effekter.

Beskrivelse af den praktiske udførelse af grave rende case.

Gravemaskinen starter udgravning og fylder sin graveskovl (en let graveskovls-type). Skovlen løftes og maskinens førerhus drejes få grader, og skovlen tømmes ved siden af renden. Skovlen føres tilbage til renden og processen fortsættes. I takt med at renden forlænges foretages der et bakkende positionsskift. Den færdige rendelængde er ca. 50 m. og med en dybde på 2 m, der svarer til skovlens lodrette højde. I en efterfølgende test graves en ny rende parallelt med den foregående rende. Med rendelængderne kan arbejdsudbyttet/produktiviteten af to tests sammenlignes kvalitativt.

Case resultater

Gravemaskine: CAT 325F L (Stage IV) med let graveskovl

Stage IV emissions standard: NOx = 0.4 g/kWh, CO = 5.0 g/kWh & PM = 0.025 g/kWh

TABEL 26. Case resultater.

Brændstof	Mode	Testtid	NOx	CO	PM	Brændstofforbrug	Rende gravet
		min		g/kWh*	#/kWh**	kg/h	meter
Diesel	POWER	35	-	-	-	20.8	50
Diesel	ECO	30	-	0.02	8.4e10	18.4	55
HVO	POWER	30	0.01	0.02	1.1e11	21.5	Ikke opmålt

* gram per kWh motorydelse

** antal partikler per kWh motorydelse

[1] Test er udført med fokus på emissioner fra HVO ift. diesel

Ovenstående tabel viser, at det i casen har været muligt i ECO-mode at grave en rende der er 5 meter længere end en tilsvarende rende i POWER mode. Derudover fremgår det, at den 5 meter længere gravede rende i ECO-mode er gravet på 5 minutter mindre. Data er hentet fra et forsøg, hvor hver case kun blev udført én gang. Forsøget startede med gravning af rende i power-mode, hvorfor det kan have haft en vis indvirkning på resultaterne at føreren af entreprenørmaskinen lige skulle vænne sig til at operere maskinen. Forsøget er derfor be- hæftet med en vis usikkerhed.

De beregnede forbrug viser dog en klar tendens mod reduceret brændstofforbrug og øget produktivitet ved brug af ECO-mode ifm. grave-rende-opgaver.

Hvilke udfordringer har der været ved gennemførsel af casen

-

Hvilke kompetencer/ressourcer er en forudsætning for at gennemføre casen?

Følgende kompetencer er vurderet vigtige i arbejdet med at grave rende og den efterfølgende databehandling.

Praktiske kompetencer

- Sikre ensartet jordforhold for de render der skal sammenlignes
- Erfaren operatør der kan grave to ens render

Analytiske kompetencer

- PEMS-måleudstyr er nødvendigt hvis man vil analysere emissionsdata. Det er dog ikke en forudsætning for måling af brændstof. Her kan maskinens brændstofmåler benyttes.
- Dataudtræk af CAN bus fra entreprenørmaskinen. CAN bus er et standardiseret system, der bruges på entreprenørmaskiner. Det får enhederne på maskinen til at kommunikere sammen. Af de data kan man bl.a. aflæse motorydelsen.

ESG værdiskabelse

(E) Hvad er den miljø- og klimamæssige effekt af det implementerede tiltag?

Tabellen under 'case resultater' viser, at der både er en brændstofbesparelse og en produktivitetsgevinst ved at grave rende i ECO-mode frem for POWER-mode.

Vi ser mere konkret at brændstofforbruget i POWER-mode er på 20,8 kg/h mens brændstofforbruget i ECO-mode er på 18,4 kg/h. Tabellen viser desuden at der i POWER-mode kun graves 50 meter på 35 minutter. mens der i ECO-mode graves 55 meter på 30 minutter. Brændstoffreduktion pr. gravet meter rende kan følgende beregnes til 31% og produktivitetsgevinsten, i meter gravet pr. time, kan beregnes til 28%.

Vi ser altså en markant reduktion af brændstofforbruget i ECO-mode med en tilsvarende markant øget produktivitet, forudsat at det er en erfaren maskinfører, der udfører opgaven. Resultaterne er specifikke for denne case, og andre omstændigheder kan give et andet resultat.

(S) Hvad er den sociale effekt af det implementerede tiltag?

Den afledte effekt af et lavere brændstofforbrug, er færre udledte emissioner lokalt omkring entreprenørmaskinen. Ved stage IV er der effektive partikelfiltre installeret. Der findes dog stadig farlige nanopartikler, som ikke opsamles.

(G) Hvad er den ledelsesmæssige effekt af det implementerede tiltag?

Dette forsøgselement udskiller sig fra de øvrige ved at implementering ikke kræver investering i nyt udstyr. Effekten kan opnås gennem ændring af adfærd, herunder via en justering af den interne operatøruddannelse.

Omkostninger

Hvad er de forventede økonomiske omkostninger forbundet med casen?

Der er som tidligere nævnt ikke nogen nævneværdige økonomiske omkostning forbundet med implementering men der er markante økonomiske gevinster. Den økonomiske gevinst ligger i den besparede brændstofmængde estimeret til 31% og den øgede produktivitet estimeret til 28%.

Refleksioner

Hvilke erfaringer eller eksisterende indsatser kan man bygge videre på? Synergier med andre indsatser?

Operatøruddannelse/træning

Hvordan ville forretningspotentialet se ud for en mindre eller større byggeplads?

Potentialet afhænger ikke af byggepladsens størrelse men udelukkende af meter rende som skal graves.

Hvilket marked kigger vi ind i og hvad er fremtidsudsigterne?

Markedet for et mere bæredygtigt drivmiddel til entreprenørmaskiner peger mod el, men også HVO, brint og andre løsninger byder sig til. Vi kan dog ikke komme udenom, at vi bevæger os væk fra de fossile drivmidler, og over til de vedvarende. Både ift. elektriske maskiner og biobrændstoffer så gælder det om at reducere forbruget. Dette bl.a. for at øge operationstiden for elektriske maskiner og for at undgå unødigt høje meromkostninger til biobrændstoffer.

Slutrapport - Fremtidens Grønne Byggeplads

Denne slutrapport præsenterer resultater fra det MUDP-finansierede fyrtårnsprojekt "Fremtidens Grønne Byggeplads", der har fokuseret på at identificere og evaluere teknologier og tiltag til reduktion af byggepladsers miljø- og klimapåvirkning. Projektet demonstrerer, hvordan måling af energiforbrug og emissioner kan bidrage til kvalificeret reduktion gennem elektrificering, biobrændstoffer, digitalisering og ændrede adfærdsmønstre. Digitalisering er identificeret som nøgelfaktor for optimering af byggepladsdriften. Anvendelsen af sensornetværk til realtidsovervågning af elforbrug, emissioner og støjniveauer har givet værdifulde data til mere effektive beslutninger. Elektrificering af entreprenørmaskiner viser betydeligt potentiale med energibesparelser på over 40% sammenlignet med dieseldrevne maskiner, mens CO2 reduceres med mere end 80% ved anvendelse af dansk elnet. Analyser viser, at biobrændstoffer som HVO-biodiesel kan medføre CO2-reduktioner på op til 87%. Energieffektive skurvogne med solceller og varmepumper reducerer energiforbruget markant og forbedrer indeklimaet, hvilket bidrager til et bedre arbejdsmiljø. En digital twin-platform, supporteret af bl.a. BIM-data, tårnfotos og telematik-data, er udviklet til optimering af logistik og ressourceudnyttelse. Forretningsanalyserne understreger de økonomiske potentialer ved implementering af udvalgte teknologier, der kan føre til betydelige langsigtede besparelser og styrke konkurrenceevnen. Rapporten anbefaler en strategisk tilgang til at integrere teknologierne for at opnå både miljømæssige og økonomiske gevinster. Samlet konkluderer rapporten, at projektet har tilvejebragt værdiskabende indsigter i, hvordan byggebranchen kan opnå betydelige miljø- og klimagevinster ved at integrere innovative teknologier i fremtidige byggeprocesser.



Miljøstyrelsen
Tolderlundsvej 5
5000 Odense C

www.mst.dk