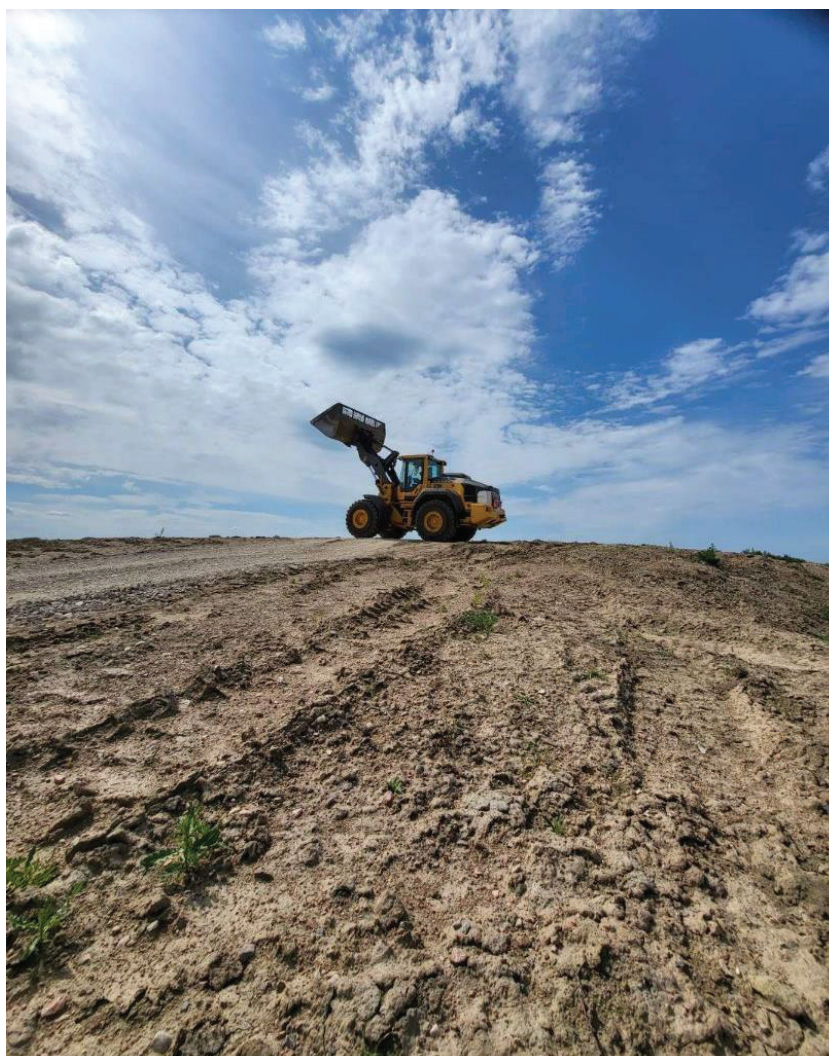


# Elektrifierad Materialhantering

Publik rapport

Författare: Niklas Lindblom, Andreas Hjertröm  
Datum: 20231130  
Projekt inom **Fossilfria Mobila Arbetsmaskiner**



**FFI** Fordonsstrategisk  
Forskning och  
Innovation

VINNOVA

Energimyndigheten

TRAFIKVERKET

FKG

VOLVO

SCANIA

VOLVO

SCANIA

VOLVO

SCANIA

VOLVO

SCANIA

VOLVO

# Innehållsförteckning

<b>1 Sammanfattning .....</b>	<b>3</b>
<b>2 Executive summary in English.....</b>	<b>4</b>
<b>3 Bakgrund.....</b>	<b>5</b>
<b>4 Syfte, forskningsfrågor och metod .....</b>	<b>6</b>
<b>5 Mål .....</b>	<b>6</b>
<b>6 Resultat och måluppfyllelse .....</b>	<b>7</b>
6.1 AP1 Administration.....	7
6.2 AP2 Site & Processanalys .....	7
6.3 AP3 Optimering av energieffektivitet i framtida materialhanteringssystem .....	12
6.4 AP4 Maskinutveckling .....	19
6.5 AP5 Energilagring .....	21
6.6 AP6 Infrastruktur .....	24
6.7 AP7 Automatiserade laddlösningar för manuellt opererade maskiner.....	25
6.8 AP8 Beteende och acceptans.....	27
6.9 AP9 Stödsystem.....	29
6.10 AP10 Utvärdering av affärsmodeller och dess miljöeffekter .....	34
6.11 AP11 Systemdemonstrationer i tre olika applikationer .....	54
<b>7 Spridning och publicering .....</b>	<b>64</b>
7.1 Kunskaps- och resultatspridning.....	64
7.2 Publikationer.....	64
<b>8 Slutsatser och fortsatt forskning .....</b>	<b>65</b>
<b>9 Deltagande parter och kontaktpersoner.....</b>	<b>66</b>

Kort om FFI

FFI är ett samarbete mellan staten och fordonsindustrin om att gemensamt finansiera forsknings- och innovationsaktiviteter med fokus på områdena Klimat & Miljö samt Trafiksäkerhet. Satsningen innebär verksamhet för ca 1 miljard kr per år varav de offentliga medlen utgör drygt 400 Mkr.

Läs mer på [www.vinnova.se/ffi](http://www.vinnova.se/ffi).

# 1 Sammanfattning

Elektrifierade medelstora arbetsmaskiner kräver helsystemlösningar som möjliggör att både entreprenad- och industribranschen kan bli mer klimatneutral inom några år. För effektiv implementering är det viktigt att förstå respektive branschs utmaningar på site, kopplat till risker där hela systemet måste utvärderas, analyseras och lösas innan driftsättning, bl.a. energiinfrastruktur (såsom kraftnätverk och lagringsmöjligheter), laddningslösningar, stödsystem, optimerad energieffektivitet av maskinerna men också miljöpåverkan, beteende – och acceptansfrågor över värdekedjan. Medelstora maskiner står dessutom för en betydande del av miljöpåverkan, från 35-60% av CO2 utsläppen för arbetsmaskiner.

I projektet Elektrifierad Materialhantering har nyckelaktörer inom materialhanteringsbranschen gått samman för att minimera risker vid driftsättning, samt för att utvärdera elektrifierade medelstora maskiner i tre olika applikationer; tillverkning, återvinning och processindustri (på entreprenad). Olika applikationer har olika förutsättningar. Gemensamt är att företag, små och stora, som använder medelstora maskiner värderar hög driftssäkerhet. Målet i projektet var att med bibehållen produktivitet och kundacceptans, skapa tre fossil- och emissionsfria systemlösningdemonstrationer för medelstora arbetsmaskiner. Detta är grunden för hur marknadsintroduktionen kan påskyndas för hel-elektriska arbetsmaskiner av medelstor storlek. Introduktionen av elektrifierade arbetsmaskiner är viktigt för Sverige och tillverkningsindustrin av tunga fordon. Den är också viktig för materialhanteringen och för att internationellt visa vägen för en minskning av fossilrelaterade emissioner och för en mer cirkulär och hållbar ekonomi.

Som en del i detta har projektet, med hjälp av LCC-analyser, utvärderat effekterna av cirkulära och elektrifierade affärsmodeller ur olika användares perspektiv, dvs. den finansiella påverkan med fokus på att förbättra affärsmodellens hållbarhet och lönsamhet över tid. Resultatet är en modell som kan användas som beslutsstöd med LCC via utvärdering av cirkulära affärsmodellens finansiella effekter utifrån olika användares perspektiv.

En grundtanke med projektet var att utvärdera maskiner och maskinsystem i verklig miljö i riktiga applikationer. Samtliga systemdemonstrationerna i projektet visar tydligt att bibehållen produktivitet och kundacceptans kan uppnås med en systemlösning för medelstora emissionsfria arbetsmaskiner. Dock kräver en emissionsfri lösning mer nogsam planering än del fossil drivna för att bl.a. få till en stabil energiförsörjning. Viktigt är att ta hänsyn till planering av arbetsplatsen, inklusive schemaläggning, samt att randvillkoren på respektive arbetsplats, med given arbetsuppgift och operatörsbeteende, sätter systemlösningen. Givet arbetsuppgiften, finns tekniken att lösa uppgiften i samtliga testmiljöer emissionsfritt med hjälp av elektrifierade arbetsmaskiner. Gällande elektrifiering av maskiner, inom såväl materialhanteringsbranschen som anläggningsbranschen, så framkallar citatet från en av operatörerna **”det är en hjullastare, bara med batterier i stället för dieselmotor”**, positiva tankar framåt.

Projektet har varit ett lyckat samarbete mellan Volvo Construction Equipment, Volvo Penta, Stena Recycling, NCC, OSAB och Heidelberg Materials.

## 2 Executive summary in English

Electrified medium-sized work machines require complete system solutions that enable both the contracting and industrial sectors to become more climate neutral within a few years. For effective implementation, it is important to understand the respective industry's challenges on site, linked to risks where the entire system must be evaluated, analyzed and resolved before commissioning, i.a. energy infrastructure (such as power networks and storage options), charging solutions, support systems, optimized energy efficiency of the machines but also environmental impact, behavior – and acceptance issues across the value chain. Medium-sized machines also account for a significant part of the environmental impact, from 35-60% of the CO<sub>2</sub> emissions for work machines.

In the Electrified Material Handling project, key players in the material handling industry have come together to minimize risks during commissioning, as well as to evaluate electrified medium-sized machines in three different applications; manufacturing, recycling and process industry (outsourced). Different applications have different prerequisites. What is common is that companies, small and large, that use medium-sized machines value high operational reliability.

The goal in the project was to create three fossil and emission-free system solution demonstrations for medium-sized work machines while maintaining productivity and customer acceptance. This is the basis of how the market introduction can be accelerated for medium-sized all-electric work machines.

In the project, the actors worked together to carry out on-site demonstrations and thus drive development at both higher and lower TRL levels. Work is divided into eleven work packages ending with site demonstrations at three sites:

- Production at **Volvo CE's** component factory in Eskilstuna
  - Medium-sized electric wheel loader in pallet handling in system solution with manual, automatic conductive charging and automatic inductive charging
- Process industry in **Heidelberg Cement's** fuel hall in Slite
  - Medium-sized electric wheel loader in handling recycled material in system solution with manual, automatic conductive charging and automatic inductive charging and stationary energy storage.
- Recycling in several sub-process steps at **Stena Recycling's** facilities in Halmstad
  - Medium-sized electric wheel loader in handling of recycled material in system solution with manual and automatic conductive charging
  - Medium-sized crawler excavator in handling of recycled material in system solution with manual loading with and without remote-controlled load receiver
  - Medium-sized networked wheeled excavator/material handler in handling recycled material with and without modular cable reel system in system solution with and without mobile energy storage.

The introduction of electrified work machines is important for Sweden and the manufacturing industry of heavy vehicles. It is also important for material handling and for internationally showing the way for a reduction in fossil-related emissions and for a more circular and sustainable economy.

As part of this, the project has, using LCC analyses, evaluated the effects of circular and electrified business models from the perspective of different users, i.e. the financial impact with a focus on improving the sustainability and profitability of the business model over time. The result is a model that can be used as decision support with LCC via evaluation of circular business models' financial effects based on different users' perspectives.

A main idea with the project was to evaluate machines and machine systems in a real environment in real applications. All the system demonstrations in the project clearly show that maintained productivity and customer acceptance can be achieved with a system solution for medium-sized

emission-free work machines. However, an emission-free solution requires more careful planning than some fossil fueled ones in order to e.g. achieve a stable energy supply. It is important to take into account the planning of the workplace, including scheduling, and that the boundary conditions at each workplace, with a given task and operator behavior, set the system solution. Given the work task, the technology is available to solve the task in all test environments emission-free with the help of electrified work machines. Regarding the electrification of machines, in both the material handling industry and the construction industry, the quote from one of the operators **"it's a wheel loader, only with batteries instead of a diesel engine"**, evokes positive thoughts going forward.

The project has been a successful collaboration between Volvo Construction Equipment, Volvo Penta, Stena Recycling, NCC, OSAB and Heidelberg Materials.

### 3 Bakgrund

Elektrifierade arbetsmaskiner kräver helsystemlösningar som möjliggör att både entreprenad- och industribranschen kan bli mer klimatneutral inom flera sektorer. Elektrifierade lättare fordon finns på marknaden men för medelstora fordon kvarstår en del utveckling kopplat till förväntad livslängd, kraft- och energiflöden i drivlina, batteristorlek och laddning, samt optimering av ingående komponenter [1]. Medelstora maskiner har idag ett brett användningsområde och återfinns bl.a. inom materialhantering ex. tillverkningsindustri, återvinningsindustri och cementindustri. För effektiv implementering är det viktigt att förstå respektive branschs utmaningar *on site*, vilket kan variera stort mellan olika branscher t.ex. bygg-, anläggnings- och gruvindustrin [2]. Utmaningarna innebär risker kopplat till hela systemet som måste utvärderas, analyseras och lösas innan driftsättning, t.ex. förnybar energi, energiinfrastruktur (såsom kraftnätverk och lagringsmöjligheter [3]). Risken är annars att elektrifierade maskiner fastnar i prototypstadiet då de blir tillgängliga på marknaden, dvs försenad introduktion och framgång på marknaden till följd [2]. Att inom de närmsta åren lyckas med introduktionen av elektrifierade arbetsmaskiner är viktigt för Sverige och tillverkningsindustrin av tunga fordon, men också för att internationellt visa vägen som en klimatneutral välfärdsnation.

Företag som använder medelstora maskiner värderar ofta hög driftssäkerhet. Industriprocessen ska gå 24/7 och processflödena behöver vara jämna. Företagen är i många fall små, vilket ökar riskerna vid test av nya maskiner, dvs en större ekonomisk osäkerhet [3]. Det finns även många större företag som nyttjar maskiner av denna storlek och som redan idag har en ambition att bli klimatneutrala 2030 [4,5]. Både små och stora företag efterfrågar idag elektrifierade maskiner. Best Available Technology styr dessutom mot att vissa operationer ska flyttas inomhus, vilket påverkar både arbetsmiljö och bulleremissioner. Investeringarna i elektrifierade maskiner bör därför få acceptans genom hela värdekedjan t.ex. operatör, site ansvarig, ansvarig för maskinflottan, site-ägare och underhåll. Detta innebär att flera förutsättningar med laddningsstruktur, energitillgång, livscykelperspektiv och acceptansfrågor behöver utvecklas och utvärderas inför en marknadsintroduktion.

I projektet Elektrifierad Materialhantering går nyckelaktörer inom materialhanteringsbranschen samman för att minimera risker vid driftsättning och utvärdering av elektrifierade medelstora maskiner i tre olika applikationer. Att påskynda just medelstora maskiner är viktigt utifrån CO<sub>2</sub>: i siffror står de för ca 40 % av CO<sub>2</sub> utsläppen från Volvos arbetsmaskiner, och medräknat SDLG (Volvos dotterbolag) utgör utsläppen ca 60% (Volvos egna siffror). Hjulastare och grävmaskiner, vilket demonstreras i detta projekt, motsvarar 4 resp. 5% av arbetsmaskinerna på marknaden och beräknas sammanlagt stå för 35 % av utsläppen [2].

Kort sammanfattat, i detta projekt kommer elektrifierade helsystemlösningar att utvecklas, exemplifieras och demonstreras i tre olika miljöer för materialhantering: i en tillverkningsindustri, en återvinningsanläggning och i en processindustri.

## 4 Syfte, forskningsfrågor och metod

Projektet bygger kompetens och kunskap på systemlösningar utifrån de tre utvalda demonstrationerna med elektrifierade medelstora maskiner. Det innebär att innovationen hel-elektriska arbetsmaskiner av medelstor storlek har potential att nå marknaden inom kortare tid, p.g.a. det finns fortfarande utvecklingsgap på själva siten [1]. Detta har även ett viktigt signalvärde för klimatomställningen ur både svenskt och internationellt perspektiv och för att minska osäkerheten för aktörer längs värdekedjan. Projektet genomför jämförande kvalitativa och kvantitativa analyser och rekommendationer på systemnivå. Utvärderingen beaktar reell CO2 besparing, arbetsmiljö, jämställdhet, produktivitet, kundacceptans, flexibilitet, förbättrings-område, effektiviseringspotential, energiåtgång, effektnivå, laddmönster, samt systempotential i andra applikationer och industrier för att respektive bransch uppsatta CO2-mål ska nås.

Syftet med projektet är att påvisa fossil- och emissionsfria systemlösningar för medelstora arbetsmaskiner i tre olika demonstrationer. Detta görs med företag inom både industri och entreprenad som hanterar material och har som randvillkor att bibehålla produktivitet och operatörsacceptans för att säkerställa accelererad och bred marknadsintroduktion.

I projektet samverkar aktörerna för att genomföra demonstrationer on site och därmed driva utveckling på både högre och lägre TRL-nivåer. Projektet bidrar på flera punkter till utlysningen och programområdena, t.ex. genom att:

- Energieffektivisering beaktas genom att de elektrifierade arbetsmaskinerna med tillhörande system som används i materialhanteringsdemonstrationerna analyseras för att utveckla maskiner och system som ger ännu mer optimal drift (**AP3 och TRL 3-4**)
- Laddinfrastrukturfrågor för inomhusapplikationer med 24/7 drift med operatörsfokus (**AP6, AP7, AP9, AP 8 – TRL 4-6**)
- Teknik som stödjer en övergång till förnybara bränslen, genom att utvärdera Volvo Pentas energilagring (**AP5 TRL 4**). Projektets initiala mål var att även utvärdera energilager från Stena, men valde att i stället fokusera på ett mobilt energilager från Volvo CE.
- Systemeffektivisering av arbetsplatser för energieffektiva site-operationer (**AP2, AP11 – TRL 4-7**)
- Beteende och acceptansfrågor över värdekedjan inkl. arbetsmiljö, buller och jämställdhet (operatör, site ansvarig, ansvarig för maskinflottan, site-ägare, underhåll) (**AP8**). Viktigt är också att projektet har en tydlig bedömningsgrund för miljöpåverkan på systemnivå och att framtida affärsmodeller beaktas (**AP10**).
- Automation kan i de fall som genom site och processförändringanalysen (**AP2**) leda till förslag på fjärrstyrning/helautomation för optimerad energieffektivitet (**AP3 och TRL 3-4**).

## 5 Mål

Att med bibehållen produktivitet och kundacceptans, skapa tre fossil- och emissionsfria systemlösningdemonstrationer för medelstora arbetsmaskiner.

Projektets fokus på materialhanteringsbranschen grundar sig på att branschen redan idag är viktig för att skapa ett mer hållbart samhälle, vilket förväntas med behovet av en mer cirkulär – och resurseffektiv ekonomi. Upp till 50 procent av samhällets klimatutsläpp är en direkt följd av en linjär hantering av våra materialflöden [6].

Demonstrationerna inom materialhantering *görs i samverkan* mellan Volvo CE, inom företagets egna operationer i Eskilstuna, med slutkunden och samarbetspartnern Stena Recycling på Halmstadsanläggningen, samt med NCC, OSAB, HC Miljö, på Heidelberg Materials fabrik, Slite.

Dessa demonstrerar Volvo Pentas och Stenas energilagringlösningar i olika applikationer med olika elnätetsförutsättningar. Genom att samarbeta med forskare från Linköpings universitet utvärderar vi miljöpåverkan och framtida cirkulära affärsmodeller med hjälp av livscykelanalys och livscykelkostnadsanalys.

Projektets känslighetsanalys med tre olika demonstrationer synliggör kunskap och parametrar som kan spridas till andra branscher och olika yrkesroller för att påskynda marknadsintroduktion av medelstora elektrifierade maskiner inom ex timmerhantering, fjärrvärme, bygg och anläggningsindustrin och andra industriella applikationer. Utöver bidrag till Science Based Targets [7] och det så kallade Parisavtalet [8] och Sveriges mål att bli klimatneutral nation 2045 [9], Fossilfritt Sverige [10], så berörs flera av Agenda 2030 målen [11], t.ex. Mål 9 – Hållbar industri, innovationer och infrastruktur och Mål 12 – Hållbar konsumtion och produktion.

## 6 Resultat och måluppfyllelse

I nedan kapitel sammanfattas projektets resultat och måluppfyllelse strukturerat efter de definierade arbetspaketen.

### 6.1 AP1 Administration

Projektet etablerade tidigt en styrgrupp med definierat syfte att stötta projektet och projektledaren med mer övergripande frågor och agerar som forum för projektmedlemmar att lyfta feedback eller input rörande projektstyrning eller annat som ej lämpar sig avhandlas i projektets övriga möten. Styrgruppens möten schemalades i samband med rapporteringstillfällena för projektet för att på ett bra vis kunna rapportera och följa upp budget, tidplan och leveranser. Operativa arbetet har följts upp i arbetspaketledarmöten var tredje vecka för att skapa en arena för statusuppdatering och samarbete mellan arbetspaketen.

### 6.2 AP2 Site & Processanalys

#### *Kartläggning av de olika kundsiterna & Nulägesrapport*

I flertalet sitebesök gjordes kartläggning av de olika kundsiterna för att definiera nuläget, förstå lämpliga applikationer och i slutändan sätta upp förslag på hur systemen kan implementeras i demonstrationerna.



Figur 1, Heidelberg Materials Slite, Gotland

Vid Slitefabriken, se Figur 1, produceras idag majoriteten av den cement som används i Sverige. Anläggningen i Slite är en av Europas mest moderna och miljöanpassade cementfabriker. Här arbetar cirka 230 personer och även ett stort antal underentreprenörer och transportörer, totalt runt 430 personer.

För att tillverka cement behövs kalksten och mägersten som är en lerblandad kalksten. Båda bergarterna bryts i täkter nära fabrikerna. Den brutna stenen transporteras, krossas och mals till ett fint mjöl som förvärms innan det når cementugnen. Där upphettas mjölet till cirka 1 450 grader och omvandlas till en mellanprodukt som kallas klinker. Klinkern kyls ner och mals tillsammans med mindre mängder sand och gips. Det grå pulver som bildas är cement, som är bindemedlet i betong.

Denna process innefattar i Slitefabriken och dess täkt omkring 20st arbetsmaskiner fördelat på hjullastare, dumprar och steltruckar, utöver detta ingår även lastbilar i maskinparken. Täckens behov av arbetsmaskiner för lastning och transport av den brutna stenen till krossar och malar är uppenbar. Men processens behov av så hög temperatur och energi kräver även arbetsmaskiner för att föda ugnen med bränsle i form av återvunnet material.



*Figur 2, Stena Recycling, Halmstad*

Varje år återvinner Stena Recycling cirka sex miljoner ton avfall och uttjänta produkter från över 100 000 kunder inom olika branscher. Verksamheten bedrivs i Sverige, Norge, Danmark, Finland, Tyskland, Polen och Italien.

Med avancerade återvinningsprocesser omvandlas komplext avfall till högkvalitativa återvunna råvaror. Exempel på återvunna material är järn, metaller, plast och papper, vilka sedan säljs vidare för användning vid tillverkning av nya produkter över hela världen. Ett nytt och viktigt område där Stena Recycling bryter ny mark är återvinningen av fordonsbatterier, där ambitionen är att vara en ledande batteriåtervinnare i Europa.

Stena Nordic Recycling Center, se Figur 2, är Stena Metallkoncernens industriella återvinningsnav i Halmstad och en av norra Europas största och modernaste återvinningsanläggningar. Komplexa material från kunder i flera länder återvinns här på moderna och effektiva sätt.

På återvinningsanläggningarna är arbetsmaskiner en essentiell kugge för att mata kvarnar, siktar och övriga processteg med material av olika slag. Totalt arbetar omkring 50 arbetsmaskiner i verksamheten i Halmstad, främst hjullastare men även materialhanterare (hjulgrävare anpassad för materialhantering). Transporter med lastbil utgör också en stor del av verksamheten.





*Figur 3, Volvo CE komponentfabrik, Eskilstuna*

Volvo CE Operations Eskilstuna, se Figur 3, är en komponentfabrik där det tillverkas axlar till hjullastare, lastvagnar och ramstyrda dumprar, transmissioner till lastare och ramstyrda dumprar samt PTO (kraftuttag) till dumprar. Fabriken som byggdes 1975 har en yta på 65.000 kvadratmeter och har två huvudflöden: bearbetningsflöde och monteringsflöde. Dessutom finns här ett lågvolymsflöde som konstruerar och tillverkar verktyg, fixturer, lyftredskap och utrustning till den övriga verksamheten. Här finns också ett måleri samt ett hårdverk.

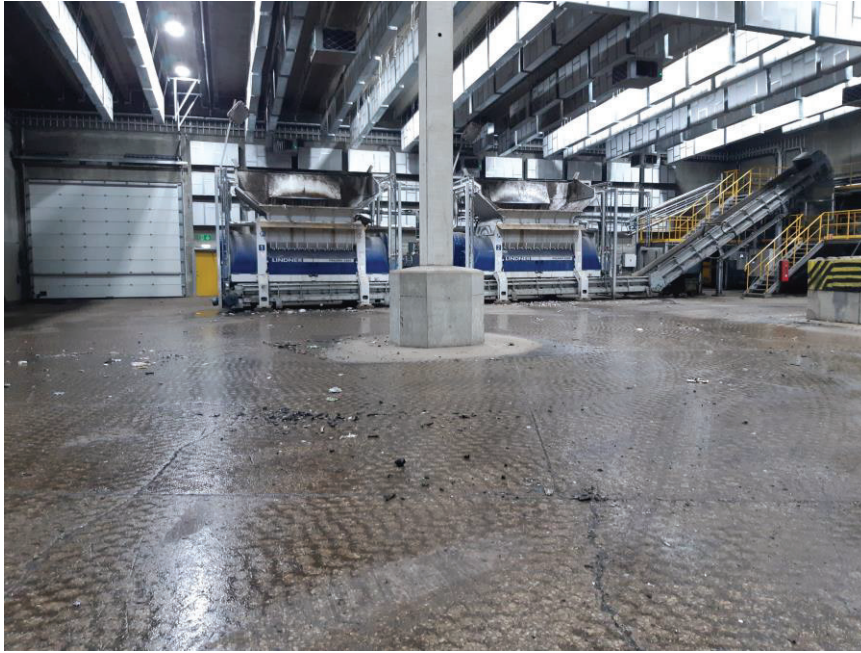
I denna process används inom fabriken väggar en stor mängd gaffeltruckar för transport av råmaterial och komponenter. Inflödet av råmaterial in i fabriken och hantering av färdiga axlar, transmissioner och kraftuttag från fabriken genomförs med arbetsmaskiner. Flottan av arbetsmaskiner uppgår i dagsläget till omkring fem medelstora hjullastare.

### ***Förslag till hur systemet kan implementeras i demonstrationerna (rapport)***

Baserat på kartläggningen och nuläget på kundsiterna följer nedan förslag på tilltänkt applicering av maskiner och systemlösningar lämpliga som systemdemonstrationer i projektet.

### ***Heidelberg Materials Slite, Gotland***

Den applikation som anses lämplig som systemdemonstration är att ersätta den medelstora dieseldrivna hjullastare som idag matar fyra fickor med bränsle (återvunnet material) som sedan förs vidare i ett antal process steg innan den når ugnen, se Figur 4. Denna applikation anses lämplig av flertalet olika faktorer;



Figur 4, Tilltänkt applikation för systemdemonstration Heidelberg Materials

**1) Maskinen arbetar 24h om dygnet, 7 dagar i veckan, 11 månader om året**

Detta gör applikationen högst lämplig som systemdemonstration då ett "ett till ett" byte från dieselmaskin till batterielektrisk maskin inte kommer vara möjlig med bibehållen produktion utan att försämrings arbetsmiljön för operatörerna. Maskinen kommer behöva laddas vid varje möjligt tillfälle (oppurtunity charging) vilket är en hörnpunkt som framtida emissionsfria lösningar måste kunna hantera. Den tilltänkta lösningen är att automatisera laddningen, för att inte skapa negativ inverkan, gå in och ur maskin flera gånger per skift, ibland flera gånger i timmen, för att sedan i projektet jämföra mellan en manuell laddlösning och två automatiska laddlösningar.

**2) Maskinen arbetar inomhus**

Potentiell positiv påverkan på arbetsmiljö i form av inga lokala emissioner och minskat buller

**3) Inga ferrita material**

Då en av de automatiska laddlösningarna som ämnas testas i projektet baseras på induktiv laddning måste det säkerställas att inga ferritmaterial hamnar mellan markdelen av laddutrustningen och maskindelen av utrustningen. Vid ett första test av tekniken passar en applikation där fokus inte behöver ligga på detta bra.

**4) Brandrisk**

Då det är bränsle till ugnen som hanteras i form av återvunnet material ökar risken för brand initierad om av torrt material i kontakt med maskinens heta ytor. Med en batterielektrisk maskin försvinner de heta ytor som till exempel turbo och efterbehandlingssystem som traditionellt sett kan skapa denna typ av problematik.

**5) Tillgänglig effekt i nätet**

Heidelberg Materials har i mångt och mycket väldigt bra tillgång till effekt i nätet då deras process kräver mycket energi i flera processteg. I denna applikation finns dock behov av ett energilager för att inte behöva bygga ut den befintliga nätanslutningen vilket skapar ett tillfälle att ha med ett peak shaving energilager i systemdemonstrationen.

Baserat på ovan föreslås en systemlösning där en batterielektrisk medelstor hjullastare kompletteras med olika laddlösningar, både automatiska och manuella som i sin tur stöts av ett energilager.

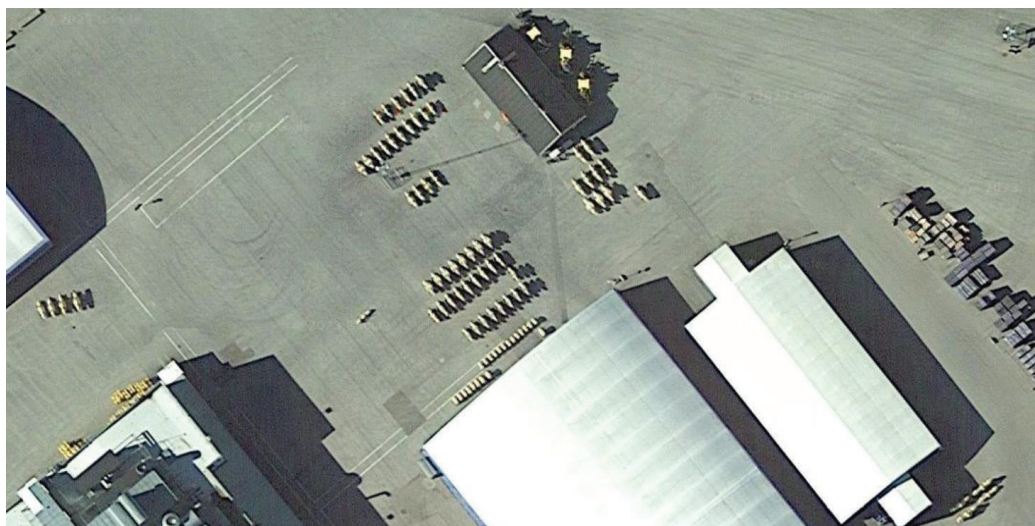
## **Stena Recycling, Halmstad**

Med sina ca:50st arbetsmaskiner, de flesta maskinerna med en dedikerad arbetsuppgift, gör att anläggningen har många potentiella systemdemonstrationer för projektet i form av olika maskintyper och maskinuppsättningar.

Av maskinerna består flertalet av olika hjullastarapplikationer varpå ett förslag till systemdemonstration är batterielektrisk hjullastare. I detta fall kompletterat med manuell och automatisk konduktiv laddning då det förekommer ferritmaterial hos Stena Recycling gör att projektet väljer att inte göra utvärderingen av det induktiva laddsystemet på denna site. För hjullastaren väljer projektet att inte bestämma en specifik applikation förens närmare demonstrationstillfället då mängden av möjliga applikationer gör det möjligt att välja utifrån vad som vid tillfället passar bäst sett till Stena Recyclings produktion. Positiva effekter kring faktorerna som nämndes för föreslagen applikation hos Heidelberg Materials förekommer även här. Då test av energilager för att stötta svagt nät föreslås till systemdemonstrationen på Gotland anses det mer värdeskapande att göra flera distribuerade tester med flera maskintyper hos Stena Recycling i stället.

Med ovan resonemang föreslås att testa nätansluten materialhanterare (hjulgrävare anpassad till materialhantering) tillsammans med olika stödsystem som återbringa viss flexibilitet till maskinsystemet som går förlorad på grund av att maskinens räckvidd fysiskt begränsas av en kabelanslutning. Stena Recycling har idag redan nätanslutna materialhanterare vilka klarar sin uppgift effektivt så länge de förblir stationära. Projektet ämnar bidra till systemlösningar som innebär att maskinerna bättre kan förflyttas, dels mellan arbetsstationer och till service eller tvätthall, dels till viss del inom sin givna arbetsuppgift. Precis som i hjullastarfallet finns flertalet applikationer hos Stena Recycling där denna typ av systemdemonstration kan genomföras.

Utöver detta föreslås även att sätta upp en systemdemonstration med bandad grävmaskin som anpassas med grip för att kunna arbeta i materialhanteringsapplikation. Detta kan tyckas underligt då det är fel maskin för uppgiften, men det är ändå värdeskapande för projektet då detta möjliggör en jämförelse mellan batterielektriska och nätanslutna materialhanterare. Men under projektets gång kommer en batterielektrisk bandad grävmaskin kunna utnyttjas för test i projektet vilken öppnar för ett nytt maskinsystemtest tillsammans med fjärrstyrd framtida lastbärare. Maskinen lämpar sig för detta då den har elektriskt servo i stället för hydrauliskt, vilket innebär enklare integration av fjärrstyrning av lastbäraren från reglagen i grävmaskinshytten. Grävmaskinen kan då testas i en statisk applikation för att inte behöva larva långa sträckor och sedan kompletteras med den fjärrstyrda lastaren för att återigen titta på hur flexibilitet kan återbringas med hjälp av en systemlösning. Utöver att återbringa flexibilitet till en statisk maskin är denna maskinsystemssetup intressant för batterielektriska maskiner överlag, då övergången från energität diesel till batteri som energikälla innebär att mer energieffektiva lösningar behöver utvecklas. Att förflytta enbart en liten lastbärare, istället för till exempel köra material med hjullastare längre sträcka, är en tänkbar lösning för att minska energiåtgången för arbetet.



*Figur 5, Volvo CE komponentfabrik, Eskilstuna*

I Volvo CE's komponentfabrik i Eskilstuna, se Figur 5, används hjullastare för avlastning av råämnen och delkomponenter från lastbil och lastning av färdiga transmissioner, axlar och kraftuttag. Elektrifieringen av logistikflödet invändigt i fabriken är redan genomförd i form av elektrifierade truckar. Arbetsmaskin-flottan består av fem medelstora hjullastare.

Föreslagen systemdemonstration är att ersätta en dieseldriven hjullastare med en batterielektrisk för hantering av godset med pallgafflar. Även i denna applikation föreslås att ställa upp både manuell laddning samt konduktiv respektive induktiv automatisk laddning. I detta fall inte för att applikationen i sig behöver det då maskinen inte arbetar dygnet runt och inte med särskilt hård belastning. Utan dels för att få flera synpunkter på de olika laddningssystemen, dels för att framtvinga flera installationer av laddningssystemen för att kunna bedöma hur komplicerade de är att driftsätta. Vidare föreslås att använda fabriken i Eskilstuna som första site för systemdemonstrationen med batterielektrisk hjullastare och laddningssystemen på grund av dess närhet till Volvo CE's kontor för produktutveckling. På detta vis kan projektet förbereda systemen och vara väl förberedda inför testet i Slite.

### **6.3 AP3 Optimering av energieffektivitet i framtida materialhanteringssystem**

#### ***Dokumenterad energistudie utifrån maskin användning i kundapplikation***

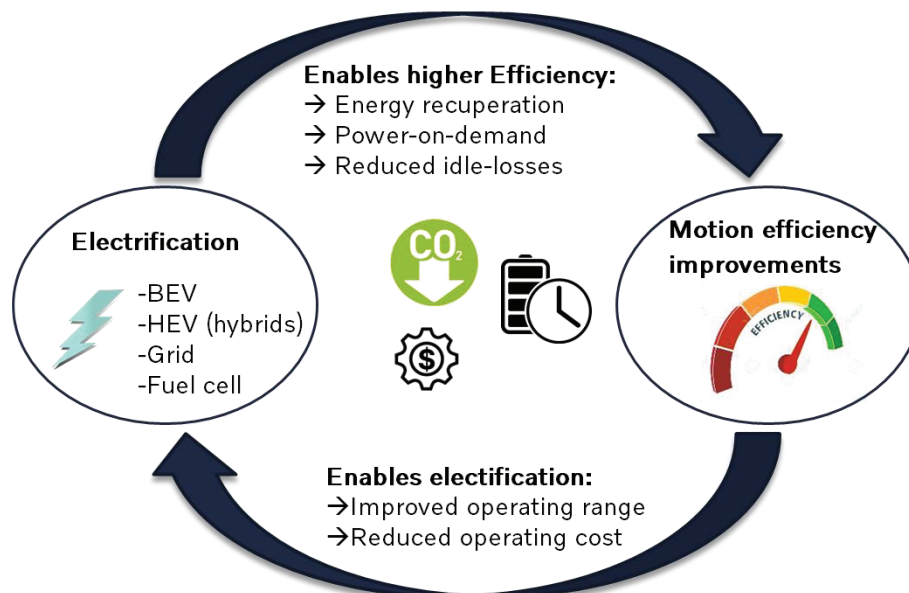
Sedvanligen inom arbetsmaskiner är det svårt att göra 100% jämförande studier, speciellt i materialhanteringsapplikationer som utgörs av samtliga test i projektet, då energiförbrukningen är väldigt beroende på arbetet som utförs under mätningen. Detta är påtagligt i de testade applikationerna då arbetsbelastningen är väldigt varierande, beroende på inkommande material just för stunden. Av denna anledning valdes det att göras längre låggranulära mätningar, vilka samtliga indikerade en energiförbrukning på cirka 1/3 för de elektriska maskinerna jämfört med de konventionella dieseldrivna maskinerna. Detta är logiskt och rimligt när systemverkningsgraden betraktas för en dieseldriven maskin jämfört med ett elektrifierat system.

#### ***Kravställning och preliminärdesign av alternativa framtida energieffektiva rörelsesystem***

Det centrala temat som utforskats i detta arbetspaket är frågan: **"På vilket sätt kan designen av maskiners rörelsesystem förenkla elektrifieringsprocessen inom materialhantering?"**

Svaret på denna frågeställning baserat på insikter från våra studier inom projektets samt kopplade projekt på Volvo kan sammanfattas så här:

**"Elektrifiering innebär inte enbart striktare krav på maskinernas energieffektivitet, utan öppnar även nya vägar för optimering. Dessutom bidrar förbättringar av rörelsesystemen till att ytterligare underlätta elektrifieringen."** Denna insikt är kritisk för att påskynda övergången till elektrifierade arbetsmaskiner. Nedan följer en illustrativ bild som visualiserar denna slutsats:



Figur 6, Bild som visar samspelet mellan effektivisering och elektrifiering

Arbetet inom detta arbetspaket har huvudsakligen drivits internt på Volvo, där en rad interna utvecklingsprojekt har integrerats. Arbetspaketet har koordinerat kunskapsutbyte mellan det pågående FFI projektet och anslutna utvecklingsprojekt.

Projektets studier har koncentrerat sig på att utforma en övergripande kravprofil för framtida rörelsesystem med tanke på behoven och möjligheterna som uppstår genom elektrifiering. En djupgående studie har också genomförts med fokus på två lovande tekniska lösningar för att effektivisera maskinernas arbetsfunktioner. Slutsatser och lärdomar från dessa studier sammanfattas i kommande kapitel.

### **Övergripande kravbild för rörelsesystem vid elektrifiering:**

Baserat på de insikter vi samlat inom ramen för detta projekt, har vi identifierat flera nyckelaspekter som är avgörande för att utforma framtidens mer effektiva rörelsesystem. Dessa insikter har varit vägledande för att forma kravspecifikationen för framtidens rörelsesystem.

Först och främst betonas vikten av att förlänga driftstiden per batteriladdning. Detta skulle inte bara innebära en ökad effektivitet i arbetsmaskinernas dagliga användning, utan också möjliggöra användningen av mindre batterier för att utföra samma mängd arbete. Detta skulle kunna leda till en minskning av både vikten och kostnaden för batterierna, samtidigt som det förbättrar maskinernas totala driftseffektivitet.

En annan viktig faktor är att minimera laddningstiden för batterierna. Alternativt kan målet vara att sänka den installerade effekten som krävs för laddning. Genom att göra detta kan vi minska tiden maskinerna är ur drift för laddning, vilket direkt ökar deras produktivitet.

Slutligen ses stora möjligheter i att kunna reducera behovet av hög framdragen effekt eller avsäkring på arbetsplatser för laddning av batterier och/eller drift via kabel. Detta är särskilt relevant i situationer

där tillgänglig infrastruktur är begränsad eller där kostnaden för att uppgradera befintliga elsystem är för hög. Genom att minska kraven på elektrisk infrastruktur kan elektrifierade rörelsesystem bli mer tillgängliga och genomförbara även på mer avlägsna eller mindre utvecklade arbetsplatser.

Sammanfattningsvis understryker dessa aspekter vikten av att fortsätta utveckla och förbättra rörelsesystemen för arbetsmaskiner, med ett särskilt fokus på att optimera batterianvändningen och laddningsinfrastrukturen. Dessa framsteg är avgörande för att främja en bredare övergång till elektrifierade arbetsmaskiner.

Baserat på Volvos insikter i nuvarande produkters prestanda och energieffektivitet, samt den potential som identifierats i alternativa teknologier, har vi kunnat fastställa och kvantifiera specifika mål för effektivisering av framtidens rörelsesystem. Även om de exakta målen för energibesparing per produkt över tid är konfidentiella, är det tydligt att framstegen kommer att bygga på en noggrant balanserad kombination av energieffektivisering och elektrifiering.

Vid övergången till elektrifierade maskiner, utöver de befintliga kraven på energieffektivitet, kvarstår många av de traditionella kraven som funktionell säkerhet, tillförlitlighet och maskinprestanda. Elektrifieringen leder till omfattande förändringar i design och funktion hos hela maskinen, vilket resulterar i skärpta och nya krav på de enskilda delsystemen. Detta innebär att varje komponent och system måste anpassas och förfinas för att matcha de nya förutsättningarna som elektrifieringen medför. Ett illustrativt exempel på detta är inom området NVH (Noise, Vibration & Harshness). Här blir elektrifieringens inverkan tydlig genom den lägre ljudnivån hos elektriska maskiner jämfört med förbränningsmotorer, vilket lyfter fram tidigare överröstade ljud från andra komponenter som hydraulpumpar. Denna nya akustiska miljö kräver en omdesign av dessa komponenter för att minska buller och vibrationer, vilket illustrerar de förändrade kraven på delsystemen.

För maximera nyttan av övergången till elektrisk drift måste de drivna delsystemen och dess ingående komponenter anpassas/väljas så fördelar kan dras av de inneboende skillnaderna mellan elmotorer och förbränningsmotorer. Möjligheter på delsystemnivå avses fångas upp i de nya kraven är:

- Nyttja möjligheten till energiåtervinning genom elmotor, för maskinernas framdrivningssystem såväl som inom dess aktiveringssystem för arbetsfunktioner. Att återmata kinetisk energi vid retardation och potentiell energi upplagrad i arbetsfunktioner.
- Nyttja elmaskiners högre effekttäthet för att åstadkomma "frikopplingar" inom rörelsesystemen, dvs design av mer distribuerade system som undviker förlustbetingade kopplingar mellan ingående komponenter. Som exempel kan nämnas alternativa hydraulsystem där ingående arbetsfunktioner kan frikopplas genom separata delsystem med flera elmotordrivna pumpar.

Krav på den här nivån resulterar i ytterligare krav på komponentnivån där några speciellt viktiga aspekter bör framhåvas:

- Högre krav på komponenternas varvtalsområde. Elmotorer erbjuder både betydligt högre och lägre varvtal än traditionella förbränningsmotorer, vilket komponenterna behöver anpassas till.
- För att uppfylla kravet på energiåtervinning, beroende på den valda systemlösningen, kan det bli nödvändigt för komponenterna att hantera ett dubbelriktat effektflyde. Detta innebär en förmåga att inte bara omvandla elektrisk energi till mekanisk rörelse, utan även att generera elektricitet från mekanisk rörelse.

### **Alternativa framtida rörelsesystem**

Inom Volvo CE pågår en kontinuerlig och omfattande utveckling av nya rörelsesystem både för framdrivningssystem och arbetsfunktioner. Inom ramarna för det här projektet har avgränsningen varit att fokusera på ett urval av de teknologier som anses ha hög potential att påverka energieffektiviteten i vid elektrifiering av arbetsmaskiner inom det avgränsade segmentet materialhantering.

För att underlätta förståelsen kring kommande beskrivningar kan rörelssystemet i en anläggningsmaskin förenklat delas in i tre huvudsakliga delsystem:

- Primärdrivkälla (energilagring+motor)
- Framdrivningssystem (transmission)
- Arbetsfunktioner (aktuering)

Framdrivningssystemen bygger primärt på roterande rörelser, som utväxlas i olika steg genom transmissioner, som typiskt är rent mekaniska eller i vissa fall hydraulmekaniska, för att i slutändan driva hjul eller larvband. Arbetsfunktionerna å andra sidan bygger vanligtvis på linjära rörelser som i dagens produkter uteslutande hanteras genom hydraulcylindrar. För att driva hydraulcylindrar krävs pumpar, som är roterande maskiner som konverterar primärkällans mekaniska rotationsenergi till hydraulisk energi. Även arbetsfunktioner kan bestå av rent roterande rörelser, som exempelvis svängfunktionen på grävmaskiner eller ett sopaggregat på en hjullastare, som även dessa typiskt drivs av hydraulmotorer via samma hydraulsystem.

I den enklaste formen av elektrifiering byts enbart primärdrivkällan ut; en förbränningsmotor försörd från en tank ersätts med en elmotor försörd från ett batteri och/eller nätslutning. Då moderna elmotorer har åtminstone dubbelt så hög verkningsgrad som moderna dieselmotorer så når man redan i detta steg åtminstone en halvering av energiåtgången för samma mekaniska arbete (alltså på motorns drivaxel). I sån här konvertering behålls övriga rörelsesystem i princip intakta och enbart mindre vinster är att förvänta inom framdrivning och arbetsfunktioner som följd av reducerade "tomgångsförluster", då elmotorn kan jobba på avsevärt lägre varvtal än förbränningsmotorn eller i vissa fall helt stängas av. Men, för att möta tidigare beskrivna krav på energieffektivitet, bör större effektiviseringar även av övriga rörelsesystem genomföras.

För de roterande funktionerna blir det snabbt tydligt att nya möjligheter till energibesparing finns att hämta på grund av tidigare beskrivna olikheter mellan elmotorer och förbränningsmotorer, såsom möjligheten till energiåtervinning, utökat varvtalsområde, bättre styrbarhet och högre effekttäthet. För elmotordrift av framdrivning finns vinningar på grund av elmotorns momentprestanda vid låga varvtal som i vissa applikationer kan betyda att hydrodynamiska momentomvandlare kan skippas vilket kan spara mycket energi i synnerhet för hjullastare som ofta jobbar med höga moment och låga varvtal, exempelvis vid skopfyllnad, finns en besparingspotential i storleksordningen 15-20% i en typisk arbetscykel. Svängfunktionen på grävmaskiner är ett annat bra exempel för roterande laster där stora energibesparingar finns att hämta. Genom att enbart göra svängfunktionen elektrisk och ta tillvara på den kinetiska energin vid inbromsning finns energibesparingar i storleksordningen 10-20%, lite beroende på arbetscykel, att hämta jämfört med en elektrisk maskin utrustad med dagens hydrauliska lösning.

När det gäller funktioner som drivs av linjära aktuatorer står vi inför en distinkt utmaning när det kommer till elektrifiering. Frågan som uppstår är om bör ersätta hydrauliken med elektromekaniska aktuatorer (EMA)?

Huvudargument att gå över till system enbart baserade på EMA är typiskt följande:

- Högre verkningsgrad
- Förenklad systemarkitektur
- Mindre underhåll
- Mer noggrann reglering

Volvo demonstrerade redan år 2016 en helelektrisk kompakt-grävare med enbart EMA, där mer än en fördubbling av verkningsgraden kunde påvisas. Sedan dess har tekniken och dess bredare tillämplighet för anläggningsmaskiner studerats mer ingående, både inom och utanför Volvo. Det är tydligt att allt fler tillverkare av arbetsmaskiner undersöker möjligheten men också att allt fler börjar inse svårigheterna att ersätta dagens hydrauliska lösningar. Vad som går att konstatera är att tekniken ännu inte fått något större genomslag på marknaden, inte ens inom segmentet för mindre anläggningsmaskiner. Samtidigt som utvecklingen av elektromekaniska aktuatorer går framåt, arbetar hydraulikbranschen aktivt för att effektivisera och modernisera sina lösningar.

I det här projektet har frågan kring EMA's tillämplighet studerats djupare och ställts i relation till utvecklingen av framtidens hydraulik. Studien knyter an till tidigare och pågående interna utvecklingsprojekt, och för de specifika

koncept som studerats mer ingående har i synnerhet lärdommar nyttjats från två parallellt pågående forskningsprojekt (FFI projekt):

- "Energieffektiva kompakta elektrohydrauliska komponenter och systemlösningar för arbetsmaskiner, E-hydraulik," Diariernr: 2019-027632
- "Elektrisk bomaktuator för batteridrivna grävmaskiner - Accelerate Swedish partnership - FFI – år 2021," Diariernr: 2021-04327

En central slutsats från våra studier är behovet av att nyansera det ofta framförda argumentet om elektromekaniska ställdons (EMA) högre energieffektivitet i jämförelse med hydraulsystem. Det framgår att en direkt jämförelse mellan enskilda EMAs och kompletta hydraulsystem typiskt leder till missvisande slutsatser. I en rättvisande jämförelse finns det många frågor som först behöver besvaras. Är det hela maskinens rörelsesystem som ingår i jämförelsen eller är det bara vissa arbetsfunktioner? Är det dagens hydrauliska system eller är det en framtida utveckling av dagens system man bör jämföra mot? I jämförelsen är det också viktigt att beakta flera aspekter än bara energieffektivitet såsom systemets påverkan på maskinens totalkostnad, robusthet, prestanda, säkerhet, underhåll och installation.

Här följer några av de viktigaste skillnaderna som har identifierats mellan elektromekaniska ställdon och deras hydrauliska motsvarigheter:

1. **Eftergivlighet och Stötlaster:** Hydrauliska system erbjuder en inbyggd eftergivlighet på grund av oljans kompressibilitet, och de har också tryckbegränsningsventiler för att hantera större stötlaster. EMA saknar denna inbyggda eftergivlighet, vilket kräver externa lösningar för att hålla aktuatorernas storlek inom rimliga gränser. Det finns möjligheter att öka ställdonets storlek för robusthet, men detta leder till högre kostnader och ökat utrymmesbehov. Inom ramen för pågående projekt har lösningar utvecklats som omfattar extra dämpningselement, kopplingar och aktiv motorstyrning. Dessa tillägg måste monteras direkt på ställdonet, vilket ökar dess vikt och volym.
2. **Lasthållning:** Hydrauliska system använder normalt stängda ventiler för failsafe lasthållning, som öppnas för rörelse. För EMA måste denna funktion hanteras mekaniskt, exempelvis med skivbromsar, som också monteras inuti eller ovanpå det mekaniska ställdonet. Detta medför ytterligare installationsbegränsningar.
3. **Motorplacering och Installation:** I EMAs måste motorn som driver det mekaniska ställdonet (kullskruv/rullskruv/kuggstång) sitta direkt fäst vid ställdonet, medan i hydrauliska system kan motorn placeras på annan plats och överföra kraft via flexibla slangar. Detta innebär att EMA medför nya utmaningar och begränsningar för installationen.
4. **Kraft och Hastighetsområden:** Hydrauliska system använder ofta asymmetriska cylindrar, vilka är starkare när de trycker än när de drar. Detta påverkar placeringen av cylindrarna i förhållande till den mekaniska strukturen. Till exempel, för grävmaskinens bom, är det mest logiskt att placera cylindern under bommen för att maximera lyftkraften. För EMAs, där ställdonen har ett symmetriskt kraft- och hastighetsområde, kan denna placering behöva omvärderas.

För att närma oss en konkret rättvisande jämförelse av teknologierna har vi fokuserat på att ställa ett specifikt energioptimerat elektro-hydrauliskt system, benämnt som elektro-hydrostatisk aktuator (EHA) i jämförelse med ett elektromekaniskt ställdon (EMA).

- A. **Utgångspunkt för Jämförelse:** Projektet valde att jämföra ett energioptimerat elektro-hydrauliskt system med ett elektromekaniskt ställdon för att driva en enskild aktuator. Det elektro-hydrauliska systemet som valdes för jämförelsen benämns som elektro-hydrostatisk aktuator (EHA).
- B. **Fokus på Enskild Funktion vs Flera Funktioner:** Här uppkommer en nyckelfråga - ska jämförelsen fokusera på en enskild funktion eller omfatta flera funktioner? Om vi överväger att ersätta alla funktioner i ett system med antingen EMA eller EHA, uppstår ytterligare en fråga om EHA verkligen är det mest lämpliga hydraulsystemet i ett scenario där flera funktioner är inblandade. Det finns potentiellt andra mer energieffektiva hydrauliska lösningar som skulle kunna vara bättre lämpade för att hantera flera funktioner samtidigt.
- C. **Slutsats och Valet av Fokus:** Med dessa överväganden i åtanke, bestämmer projektet att fokusera på att byta ut en enskild, avgörande funktion för att uppnå ökad energieffektivitet. Detta val begränsar jämförelsens omfattning men tillåter en mer detaljerad och fokuserad analys av de potentiella energieffektivitetsvinster genom att byta ut just denna specifika funktion till antingen EMA eller EHA.



Ett exempel på tillämpning för båda alternativen är optimeringen av bomfunktionen i en materialhanteringsmaskin, där bomfunktionen skulle frikopplas från det befintliga hydraulsystemet med en separat elmotor. Denna förändring är väsentlig då bomfunktionen idag bidrar stort till maskinens energiförbrukning och det finns potential för energiåtervinning under sänkrörelser, vilket inte tas tillvara på i nuvarande hydrauliska lösningar. Genom frikopplingen minskas även "samkörningsförlusterna" i det återstående hydraulsystemet, vilket ökar dess energieffektivitet. Förutsatt att maskinens roterande drivsystem redan är elektrifierat, kan en separerad bomfunktion ge energibesparingar i storleksordningen 30-40%. Vår studie visar att denna besparing är nästan densamma oavsett om man väljer en hydraulisk (EHA) eller elektromekanisk (EMA) lösning. Det är snarare andra aspekter som är avgörande för vilken lösning som lämpar sig bäst, där hantering av chocklaster, paketering (installation) och totalkostnad.

EMA innebär visserligen färre energikonverteringar än EHA, men det betyder inte automatiskt högre verkningsgrad eftersom det beror på komponenternas effektivitet. EMA består av en motor, växellåda och skruv/kugghjul, medan EHA innehåller motor, hydraulpump, hydraulcylinder och ventil. Varje systems verkningsgrad varierar beroende på flera faktorer.

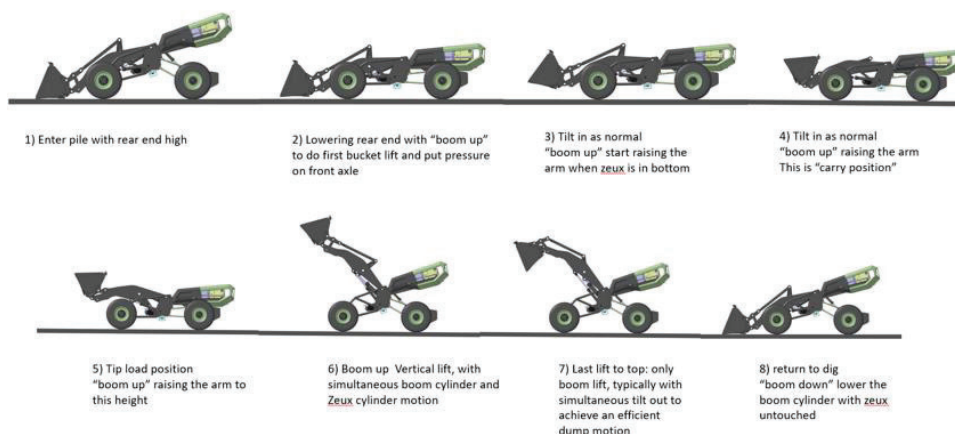
Det är fullt möjligt att en EHA med en modern och effektiv hydraulpump och cylinder kan ha högre verkningsgrad än en EMA med en sämre optimerad mekanisk transmission. Det är också möjligt att verkningsgraden varierar beroende på arbetscykeln, eftersom olika system kan ha olika förluster vid tomgång, start, stopp och varierande belastning.

Utöver verkningsgraden påverkas valet mellan EMA och EHA av många andra faktorer, såsom ljudnivå, underhållskostnader, vikt, storlek, tillförlitlighet, säkerhet och flexibilitet. Dessa faktorer kan ha olika betydelse beroende på tillämpningen och kraven som ställs på systemet. Det är därför inte möjligt att ensidigt säga att EMA är bättre än EHA eller tvärtom, utan det beror på en helhetsbedömning av för- och nackdelar med varje system där detaljer i utvärderingen fortfarande återstår att göra i framtida arbete.

Slutsatsen från vår studie är att EMA inte enkelt kan ersätta nuvarande hydraulcylindrar. För att effektivt använda EMA krävs omfattande teknisk utveckling med fokus på robusthet och noggranna studier av dimensionering, installation och relaterade system. Detta är nödvändigt för att utnyttja fördelarna med EMA och hantera dess begränsningar.

### ***Tidig utvärdering på prototyp av framtida disruptivt maskinkoncept***

Inom ramen för projektet har en utvärdering av Volvo CE's konceptmaskin LX03 genomförts i form av simuleringsstudier, demonstration av automatisk skopfyllnad och banföljning. LX03 är ett framtidskoncept för hjullastare som utnyttjar de nya randvillkor som uppstår när maskinen dels elektrifieras men främst automatiseras. Att ingen hänsyn behöver tas till operatörshytt innebär att konstruktionen kan anpassas för att tillåta ett mer energieffektivt rörelsemönster. Maskinens saxande ram innebär större rörelsefrihet och möjliggör en unik skopfyllnadsrörelse, se Figur 8. Skopan fylls delvis genom att sänka maskinens bakre del, eller motvikt, utan att lyftaggregatet fram behöver utföra något arbete vilket förbättrar stabiliteten under skopfyllnadsprocessen. Motvikten kan sedan i nästa del av cykeln lyftas uppåt och på så vis tillåta skopan att nå mycket högre vid dumpning av lasten än en konventionell hjullastare. Detta rörelsemönster ökar energieffektiviteten genom att utnyttja maskinens vikt och skapa mer kraft.



Figur 7, Volvo CE's konceptmaskin LX03

Jämförande simuleringsstudier mellan LX03 konceptet, även benämnt Zeux, och konventionell batterielektrisk hjullastare i samma maskinstorlek visar på 17,7% bättre effektivitet och 19,6% bättre produktivitet i LX03's favör, se **Error! Reference source not found.**

	Conventional Electric Wheel Loader	Zeux
Fuel Consumption (KWh)	0.4316	0.4387
Mass Delivered (ton)	3.6255	4.3376
Energy Efficiency	8.3995	9.8883
Productivity	466.1348	557.6880

Zeux is 17.7 % more fuel efficient

Zeux is 19.6% more productive

Figur 8, Jämförande studie konventionell vs Zeux

Projektet har utöver detta arbetat med att automatisera LX03 för att på sikt kunna verifiera och validera simuleringsresultaten i verkligheten. Maskinen har under projektet gått från enbart fjärrstyrt läge till att klara av banföljning med hjälp av GPS och automatisk skopfyllnad. Något som demonstrerats vid projektavslutskonferensen.

Arbete kvarstår att utveckla maskinens automationssystem med perceptions-, lokaliserings- och navigationssystem som tillåter maskinen att arbeta inomhus. Vilket är en av byggstenarna till varför maskinen demonstrerats på Volvo CE's provbana i stället för hos Heidelberg Materials eller Stena Recycling i projektet. Möjliga applikationer där maskinen kunde demonstreras kartlades tidigt i projektet. Både hos Stena Recycling och Heidelberg Materials finns flera applikationer LX03 skulle kunna drifställas i;

- Pelletshantering – lastning av bränsle i form av pellets i ficka (HeidelbergMaterials)
- Utsorterat lättmaterial – lastning till nästa steg i processen eller upplag (Stena Recycling)

Både Stena Recycling och Heidelberg Materials arbetar aktivt med säkerhetsarbete – genom att till exempel separera lastbilstrafik (in-bound, out-bound) och arbetsmaskinerna i processen. Förarlösa maskiner med hjälp av automation och fjärrstyrning har på sikt möjlighet att förbättra arbetsmiljön ytterligare genom att personal inte behöver vistas tillsammans med rörliga arbetsmaskiner. Detta kan fördelaktligen kombineras med den fjärrstyrda lastbäraren som har potential att automatiseras.

Sammantaget kommer detta öka systemverkningsgraden ytterligare och på så sätt facilitera transfereringen mot nollemissionsmaskiner inom materialhantering.

## 6.4 AP4 Maskinutveckling

### *Medelstor 15t helelektrisk hjullastare (TRL 4-7)*

Medelstor helelektrisk hjullastare har utvecklats under projektiden, Figur 9. De systemtester som genomförts i projektet är de första externa tester som genomförts med maskinen. Maskinen har för projektets räkning anpassats för att möjliggöra test av automatisk konduktiv och automatisk induktiv laddning.



*Figur 9, Medelstor helelektrisk hjullastare*

### *Medelstor 20t bandgrävare (TRL 5-8)*

Medelstor helelektriskbandgrävare, se Figur 10, har använts för tester i projektet. För projektets räkning har maskinen utrustats med grip som anpassning till materialhanteringsapplikation. Maskinen har även anpassats med speciell mjukvara och kommunikationsutrustning för att ge operatören möjlighet att välja att styra grävmaskinen eller den framtida lastbäraren med hjälp av grävmaskinens styrspakar.



*Figur 10, Medelstor 20t bandgrävare*

### **Medelstor 25t hjulgrävare (TRL 5-8)**

Medelstor nätansluten hjulgrävare, se Figur 11, har utvecklats under projektiden. De systemtester som genomförts i projektet är de första externa tester som genomförts med maskinen. Maskinen har för projektets räkning anpassats med ett modulärt kabelrullsystem och ett mobilt nättaggregat med energilager.



*Figur 11, Medelstor 25t hjulgrävare*

### **5-10 tons framtida lastbärare (TRL 3-5)**

En 5 tons koncept på framtida lastbärare har använts för tester i projektet, se Figur 12. För projektets räkning har lastbäraren anpassats med mjukvara och kommunikationsutrustning för att ge operatören i den medelstora bandgrävaren möjlighet att även styra lastbäraren med hjälp av grävmaskinens styrspakar.

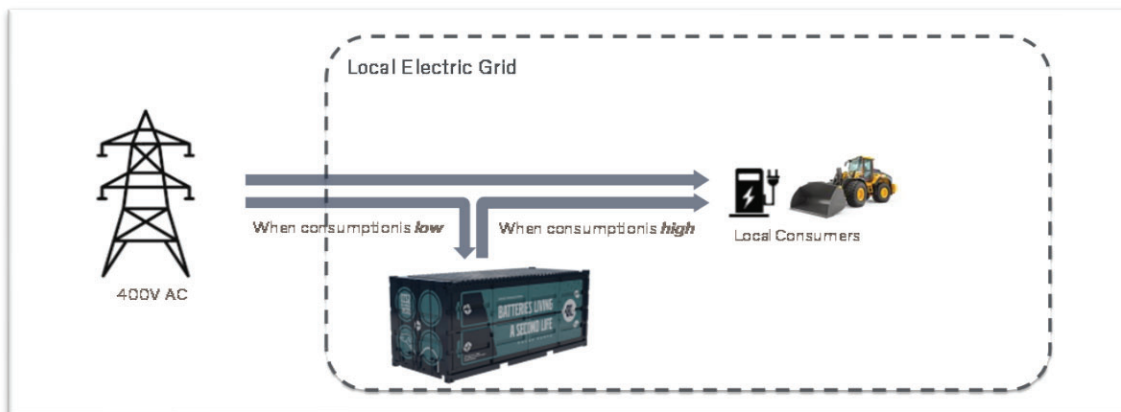


*Figur 12, Framtida lastbärare*

## **6.5 AP5 Energilagring**

### ***Flyttbart energilager med erforderliga elanslutningar till sitens elanläggningar samt till laddare (TRL 6)***

Ett energilager kan ha många möjliga användningsområden såsom att stötta ett elnät att hantera effektoppar, lagra energi från väderberoende källor (vind/sol) eller vara delaktig i stödtjänster för nationella elnät. I fallet med Slite har energilagrets funktion varit att stötta det lokala elnätet genom att höja dess kapacitet mot effektoppar. Både den induktiva och den konduktiva laddaren var inte inkopplad direkt mot energilagret utan fick sin el från elnätet, med princip enligt, se Figur 13.



Figur 13, Stöttning av lokalt elnät med energilagret

Placeringen av energilagret valdes så att kabeldragningen skulle vara enkel att lösa, varför man hade den i närheten av byggnaden i vilken laddaren befann sig.

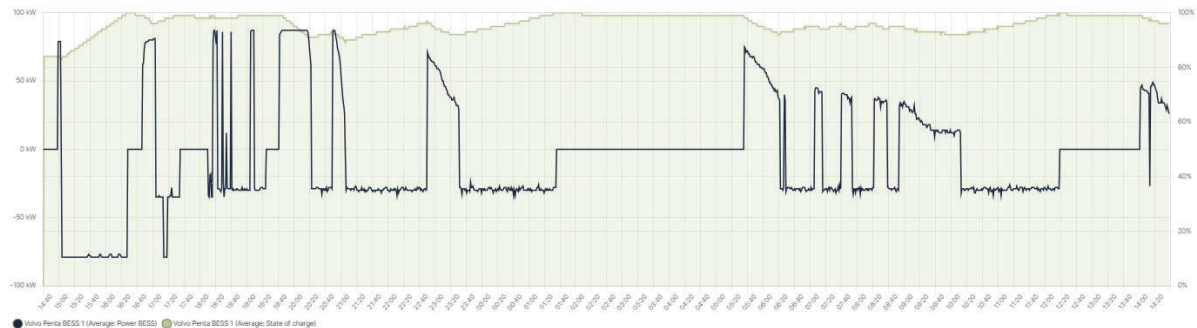


Figur 14, Energilagrets placering. Matarkablar är nergrävda i marken mellan lagret och byggnaden till vänster i bild.

Av brandskyddsskäl placerades lagret på ett sådant ställe att en eventuell batteribrand inte skulle sprida sig till närliggande byggnad, se Figur 14.

Funktionsmässigt var lagret konfigurerat i s.k. power boost-läge, vilket betyder att lagret bidrar med effekt som behövs för att mata laddarna när effektuttaget ur laddaren överstiger maxlasten. Annorlunda uttryckt, i de fall effektuttaget är på väg att överstiga effektbegränsningen börjar lagret skjuta till effekt. Understiger effektuttaget maxlasten, samt att laddnivån i energilagrets batterier understiger den inställda maxnivån, använder lagret tillgänglig effekt för att ladda upp sina batterier:

Vid användning av laddaren registrerades ett effektbehov av ungefär 170 kW. Då elnätet var dimensionerat för 125A, konfigurerades lagret till att begränsa effektuttaget från elnätet till 80 kW, vilket resulterade i att energilagret sköt till 90 kW för att få ut full effekt ur laddaren, vilket betyder att ca ¼ av lagrets maxeffekt utnyttjades. Som kan ses i Figur 15 understiger laddnivån under testperioden aldrig 90%, vilket ger vid hand att mängden fordon skulle kunna ökas betydligt, alternativt skulle lagret kunna dimensioneras ned.



Figur 15. Laddnings/urladdningskurva under en representativ del av testperioden. Gröna grafen är energilagrets laddnivå och den blåa kurvan effekten in (om negativt värde) samt ut (om positivt värde)

#### **Kommunikationslösning och basala tjänster mellan energilager, laddare, arbetsmaskiner och elnät (TRL 4)**

Kommunikationen mellan de olika delarna av systemet kan vara viktig för att kunna optimera användningen på systemnivå. I den aktuella demonstratorn på Heidelberg Material, där energilagret användes för att möjliggöra högre laddeffekt än vad som annars skulle varit möjligt, begränsades kommunikationen av praktiska skäl till den nödvändiga länken mellan lager och elnät. Här utgjordes länken av en trådad signal där energilagret var 100 ms läser ut effektuttaget i en referenspunkt i nätet vilken den jämför med den statiska effektbegränsningen.

Kommunikationslösningen visade sig fungera mycket väl för den aktuella applikationen, eftersom effektbehovet var långt ifrån lagrets totala maxeffekt samt att kapacitetsbehovet var likaledes långt ifrån att utnyttjas till fullo.

En möjlig vidareutveckling av kommunikationslösningen är en signal mellan lager och laddare för att möjliggöra en dynamisk lastbalansering i laddaren, samt mellan maskin och lager för att införa framåtblickande funktionalitet.

#### **Rekommendation om lämpligheten för 2nd-lifemoduler i denna tillämpning baserad på riggprovning (TRL 4)**

Denna faktor var ej möjlig att undersöka på det sätt som avsetts då riggprovning av moduler ännu inte är slutförd och inga resultat kunnat analyserats. Ett allmänt resonemang kan dock föras. Då kvarvarande kapacitet i ett återanvänt batteri från ett elfordon generellt är cirka 80% finns inga prestandamässiga hinder för att sätta in sådana batterier i lagret. Det viktiga är att man lyckas övervaka "hälsostatusen" (State of Health) för batteriet på ett tillfredsställande sätt så att batteriernas säkerhet kan garanteras.

#### **Mindre mobilt energilager för ökad flexibilitet av nätanslutna maskiner**

Nätanslutna arbetsmaskiner har flertalet fördelar i form av kostnad, miljöpåverkan och energieffektivitet på grund av att de inte är beroende av batterier. Däremot tappar maskinen flexibilitet

vilket kan begränsa dess användningsområde. Denna flexibilitet kan köpas tillbaka genom att bestycka maskinen med ett ombordbatteri vilket dock innebär att fördelarna vad det gäller kostnad för maskin och miljöpåverkan inte längre blir lika stora. I detta projekt utvecklades och testades ett mindre energilagret som materialhanteraren har möjlighet att bära själv, se Figur 16. Detta i syfte att utreda en systemlösning med bra möjligheter att skapa en lämplig kombination av flexibilitet, kostnad och miljöpåverkan tillsammans med en nätansluten materialhanterare. När energilagret förblir fränkopplat från maskinen innebär det att det kan delas mellan flertalet nätanslutna maskiner på site vilket innebär möjlighet till högre utnyttjande och lägre behov av batterier i systemet.



*Figur 16, Fristående mobilt energilagret*

Resultat kring denna utredning återfinns i denna rapport under "AP11 Systemdemonstrationer" ur ett rent praktiskt perspektiv. Även i AP10 finns betraktelser av hur dessa olika systemlösningar påverkar kostnader i form av LCC och miljön i form av LCA.

## **6.6 AP6 Infrastruktur**

### ***El-infrastruktur, tillräcklig för att köra demonstration framdragen och klar***

På samtliga testplatser, initialt på Volvo CE's provbana, men även på samtliga demonstrationsplatser hos Volvo CE, Heidelberg Materials, där även ett effektutjämnande energilagret kopplades in mellan laddare och nät, samt Stena Recycling i Halmstad på alla tre testplatser inom anläggningen gick elinstallationen smidigt med hjälp av kompetenta elektriker som arbetar på respektive plats. Effekt var snarare en fråga som vart den ska tas ut än om det fanns tillgängligt. En lärdom är att tidig planering är en viktig nyckel till implementering av elektrifierade arbetsmaskiner, oberoende av teknisk lösning.

### ***Rapport på metoden kring kravställning på infrastruktur i relation till energilagretstorlek och applikationsbehov***

Projektet har valt olika vägar vad gäller planeringen och kravställningen på infrastrukturen. I flertalet fall påverkar valet av hur maskinerna designas och dess kringutrustning behovet av el-infrastruktur. I vissa fall kräver inte applikationen i sig så mycket laddeffekt men projektets systemdemonstration och testplan innebär att ha med att laddeffekt förbereds för fulleffektsapplikation, i vissa fall med befintlig avsäkring, i andra fall med stöttning av svagt nät med hjälp av energilagret.

- Vad det gäller medelstor batterielektrisk bandgrävare sätter maskinens begränsning kring vad den kan ta emot, 150kW, kravet på infrastrukturen.



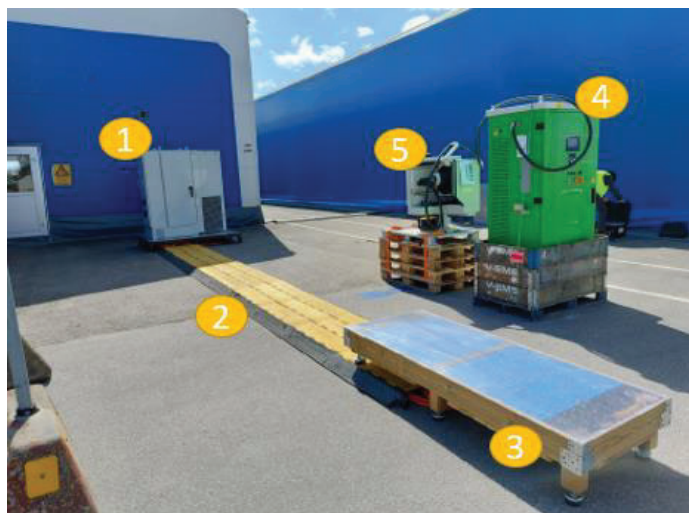
- 250A anslutning är förberett av Stena Recycling
- Vad det gäller testerna för medelstora batterielektriska hjullastaren tillsammans med både automatisk induktiv laddning, automatisk konduktiv laddning och manuell laddning så begränsas behovet på samma sätt av vad maskinen klarar av att ta emot, 150kW. Då laddutrustningarna aldrig används samtidigt under systemdemonstrationen tas inte höjd i infrastrukturen för mer.
  - 250A anslutning förberett av Stena Recycling (återanvändning av samma anslutning som testet med medelstor batterielektrisk bandgrävare)
  - 250A anslutning förberett av Volvo CE för testen i komponentfabriken SE75 – i detta fall hade lägre laddeffekt kunnat förberedas, men då testplanen ämnade testa av de automatiska laddutrustningarna anammades ”oppurtunity charging” och anslutningen dimensionerades därefter.
  - I testfallet i Slite på Heidelberg Materials anläggning fanns inte tillräckligt med ström att tillgå där testet skulle genomföras. Istället för att åtgärda detta valde projektet att istället förbereda infrastrukturen för att kunna installera och testa ett energilager från Volvo Penta för att kunna genomföra tester på hur ett energilager kan stötta ett svagt nät.
- För den nätanslutna materialhanteraren anpassades inte infrastrukturen på site utöver att Stena Recycling förberedde 2x125A CEE kontakter som komplement till 1x250A. Även i detta fall valde projektet att inte förbereda flera anslutningspunkter för maskinen utan i stället komplettera maskinen med ett mindre energilager och ett kabelrullsystem för att utvärdera hur flexibiliteten kan ökas för en nätansluten maskin, utan större negativ inverkan ur kostnads- och miljöperspektiv.

## 6.7 AP7 Automatiserade laddlösningar för manuellt opererade maskiner

### ***Rapport på utvärdering av automatiserade laddlösningar, specifikt för dessa applikationer inom materialhantering, samt hur detta kan relatera till andra applikationer***

För att upprätthålla produktion med en batterielektrisk maskin krävs i vissa applikationer att maskinen laddas vid varje möjligt tillfälle (oppurtunity charging). Att genomföra detta manuellt är fysiskt påfrestande då det innebär att operatören behöver gå i och ur maskinen varje gång laddning skall genomföras. I transformationen till emissionsfria arbetsmaskiner är det viktigt att arbetsmiljön och arbetsförhållandena inte försämras utan snarare förbättras. Med detta som bakgrund testades i projektet två olika automatiserade laddningslösningar: en induktiv och en konduktiv – båda utvalda och uppsatta för att möta behoven inom applikationen materialhantering.

För att göra en jämförande utvärdering av de två systemen sattes båda systemen upp på två siter, Eskilstuna och Slite, och testades under minst en vecka på respektive site. Dels i jämförande test mot varandra, dels i jämförelse med manuell snabbaddning. Dessutom jämfördes den konduktiva automatiserade laddningen mot manuell laddning på ytterligare en arbetsplats, Halmstad. Med totalt tre veckors test per laddningsutförande uppskattas prestanda, tillförlitlighet, effekter på arbetsmiljö och användarvänlighet vara möjligt att bedöma. Systemens robusthet kan till viss del bedömas men kräver en längre testperiod för att utrönas.



Figur 17, Systemuppställning för huvudkomponenter, konduktiv och induktiv laddning

I Figur 17, är huvudkomponenterna i systemuppställningen som användes på respektive site markerad. Kortfattad beskrivning av huvudkomponenterna;

1. Elskåp och styrningsskåp för induktiv laddningsutrustning
2. Kablage för matning och kommunikation samt slangar för köldmedia för den induktiva laddningsutrustningen
3. Markdelen av den induktiva laddningsutrustningen (2\*75kW per laddningsplatta)
4. 150kW manuell snabbbladdare
5. Laddrobot för automatisk isättning av CCS-handske

Båda automatiska laddningssystemen kräver att maskinen som skall laddas linjeras korrekt för hamna inom tolerans så att laddning kan initieras. Denna uppställning itererades fram vid första testtillfället på Volvo CEs komponentfabrik i Eskilstuna där maskinen först linjerades inom tolerans för den induktiva utrustningen för att sedan med maskinen på plats kunna fastställa robotens position. På detta vis kunde operatören linjera upp till båda utrustningarna med samma visuella hjälpmedel, se Figur 18, samtidigt som utrustningen tar upp så lite yta som möjligt av arbetsplatsen.



Figur 18, Hjälpmedel för positionering av maskin

## 6.8 AP8 Beteende och acceptans

**Rapport på empirisk studie hos kund, under demonstrationstiden, ca 2v per maskin och site, vari det framgår acceptansnivå för hela kedjan av intressenter; operatör, sitechef, maskinförvaltare, ägare.**

**Utgångspunkten är i relation till de konventionella maskinerna använda på site innan demo.**

Metoden för att studera acceptansnivån genom användarkedjan har varit intervjuer med maskinisterna som opererade maskinerna, arbetsledarna som har direkt kontakt med den dagliga driften samt arbetsplatsledarna med det övergripande produktionsansvaret. Underlaget för studien utgörs av 3 arbetsplatsledare, 6 arbetsledare och 21 maskinister. Detta från de 5 systemtesten; 15t helelektrisk hjullastare inkl. automatiserad laddning och flyttbart energilagret, 20t bandgrävare inkl. 5-10 tons framtida lastbärare, 25t hjulgrävare inkl. modulärt kabelrullsystem och mindre mobilt energilagret, som utförts i projektet. Då användarmognaden är olika för de olika maskinsystemlösningarna, och framförallt i de olika applikationerna så presenteras resultaten från beteende- och acceptansstudien separerat efter maskinlag.

### 15t helelektrisk hjullastare inkl. automatiserad laddning och flyttbart energilagret

Hjullastaren var den maskin i projektet som, för alla operativt inblandade hade högst nyhetsvärde, då ingen hade varit i kontakt med liknande maskin innan. Detsamma gällde för den automatiserade laddningen och det flyttbara energilagret som testades i samband med lastmaskinen. Naturligt är att vara skeptisk till nya teknologier, som dessutom sätter större begränsningar på operationen, i detta fall då man går från energität diesel till batterielektriska lösningar, som kräver laddning oftare än tankning i en konventionell dieselmaskin. Så var även fallet här. Initialt frågade sig, framförallt maskinisterna, och framförallt i 24/7 operationen, hur detta skulle kunna fungera.

Emellertid, vilket är kritiskt vid införande av ny teknik, var alla inblandade intresserade och öppna för förändringar för att få det nya systemet att fungera. Implementationen på komponentfabriken, hos Volvo CE, fortskred utan några problem, arbetsplatsledare och arbetsledare var övertygade om att detta är framtiden och "det kommer att fungera för att det måste", även maskinisterna var positiva redan efter initial maskinsystemgenomgång och efter att ha provat endast några timmar varpå inställningen blev "det är en maskin som producerar som vilken maskin som helst, och det där med laddning verkar ju inte vara något problem".

Väldigt liknande fortskred implementationen på Stena Recyclings anläggning i Halmstad med i princip samma inställning från ledningen och liknande kommentarer från maskinisterna, med skillnaden att här provade projektet att placera laddutrustningen på ett mindre fördelaktigt, rent geografiskt, ställe än i övriga test, där projektet försökt förenkla så mycket som möjligt för maskinisterna. I detta fall ställdes inte laddutrustningen i anslutning till naturliga pausställe, dvs fikarummet. Testet var lyckosamt, då det blev uppenbart att detta inte är icke-önskvärt, och att lokaliseringen av laddutrustningen bör planeras nogsamt för att alla intressenter i användarkedjan. Vid implementering av ny teknik, kan några hundra meter spela stor roll, om det upplevs som ett extra moment två gånger om dagen i din arbetsdag.

Vid implementationen hos Heidelberg Materials i Slite var utmaningarna större då denna operation kör dygnet runt alla sju dagar i veckan. Hos ledningen var inställningen liknande som de två föregående, emellertid var maskinisterna lite mer tveksamma. Eftersom nogsam planering gjordes, för den automatiserade laddningen, fungerade systemet som tänkt och operationen utfördes med samma produktivitet som för en dieselmaskin vilket gjorde operatörerna positiva. Tyvärr påträffades problem med värmeuppbyggnad i batteripacket på lastmaskinsprototypen, eftersom batteriet aldrig fick vila, antingen kördes maskin eller så stod den på snabb-laddning. Detta har varit en viktig lärdom och återkopplats till utvecklingen av nästa generation batterielektriska lastmaskiner. Inom projektet är förståelsen hög för att det är prototypmaskiner som använts även om det var synd att projektet fick

sänka ambitionen från 24h per dag till 12h per dag pga. värmebyggnaden, så påvisades att maskinsystemet med automatiserad laddning skulle fungera i den dagliga driften även i Slite, vilket även maskinisterna ansåg.

En lärdom som bör tas med är att maskinisterna påpekade att "årets värsta dag" inte inträffade under testet, och frågan var då skäligen "om detta system hade klarat den dagen", här anser projektet att man, vid införande av ny teknik med andra randvillkor, bör arbeta med hela processen. Detta gäller samtliga anläggningar där planering av inkommande material, om möjligt, kan spridas ut så jämt som möjligt, så det inte blir en "värsta dag" som är tio gånger så hård, utan kanske bara dubbelt. En planeringsfråga som inte lösts i projektet, utan enbart blivit belyst som en del i resultatet av vad att tänka på när slutanvändaren implementerar liknande system.

Vad gällande det flyttbara energilagret var det mestadels elansvarig på plats som var involverad, vilken i samarbete med Volvo Penta, installerade energilagret utan några problem, varpå kommentaren, "*japp, det funkar*". Detta summerar egentligen ganska bra, att även om människan må vara skeptiskt till om ett nytt system fungerar, så länge han eller hon är öppen i sinnet, så är människan lika snabb på att konstatera att det funkar. Efter en kort tid blir det till vardag och rutin ganska snart, även vid, det som initialt uppfattas som större, omställningar.

### **20t bandgrävare ink 5-10 tons framtida lastbärare**

Till skillnad från en lastmaskin, så är man van att se elektrifierade materialhanterare, vilka ibland i talspråk tituleras "kranar", inom återvinningssektorn. Detta innebär att nyhetsvärdet för 20t bandgrävaren, som adapterades till materialhanteringsapplikation, mestadels låg i att den var batterielektrisk, och inte nätansluten, vilket är praxis för elektriska materialhanterare. På samma sätt som för lastmaskintesten var ledningen av inställningen att "detta måste vi få koll på för att anpassa oss inför framtiden". I och med systemet kring just en bandgrävare, som är långsam, samt att det går mycket energi, vid förflyttning anlades laddutrustningen nära arbetsområdet. Ur arbetsperspektiv löste maskinen arbetsuppgiften snabbare än föregångaren på diesel, vilket inte hade och göra med elektrifieringen, utan mer att det var en större maskin som är mycket mer potent, varpå maskinisten var väldigt nöjd med "sin nya maskin" och upplevde inget krångel med det nya systemet. På grund att det relativt låga medeleffekten kunde man prova skillnaden på att ladda enbart efter skift jämfört med både på raster och efter skift, enligt maskinisten "inga konstigheter vilket som, maskin gör det jobbet den ska". Helt nytt var istället maskinsystemet med den teleopererade lastbäraren. Här kunde maskinisten växla mellan att operera materielhanteraren och lastbäraren, båda med spakarna i maskin.

Det som från projektet var intressant att undersöka var hur maskinisten upplevde den mentala arbetsbelastningen med att styra över två maskiner. Det visade sig dock att detta var inget som maskinisten själv reflekterade över, utan "ningen styr jag denna eller den andra, det är väl inga problem", vilket var väldigt positiv återkoppling till maskintillverkaren i projektet, då även arbetsplatsledningen såg stor effektivitetspotential, ur ett mer holistiskt arbetsplatsperspektiv i maskinsystemet.

### **25t hjulgrävare inkl modulärt kabelrullesystem och mindre mobilt energilager**

Då den nätanslutna materialhanteraren ersatte en annan nätansluten materialhanterare, var nyhetsvärdet ur maskinperspektiv i de närmaste noll, varpå från maskinperspektiv, från både ledning och maskinister var "denna gör jobbet lika bra, speciellt om vi skulle haft rätt storlek på gripben, som någon av de andra maskinerna". Storleken på gripben vad anpassad till en annan arbetsuppgift, men nödvändig omplanering i sent skede gjorde att gripben kunde varit större i denna hantering. Den problematiken har inte med maskin eller elektrifiering att göra, enbart planering. Det som i stället var intressant i detta maskintest, var kringssystemen, vilka samtliga har konstruerats för att öka flexibiliteten, som i sin natur är lägre i en nätansluten maskin, då den sitter inkopplad i anslutningen.

Det första som testades var det modulära kabeltrummesystemet, med avsikt att testa en mer industristandardiserad lösning med lägre kostnad och kortare leveranstid. Detta medförde att istället, för som traditionellt ha koll på en kabel, fanns nu dubbla kablar, vilket möttes med spörsmål initialt, emellertid eftersom kablarna aldrig integrerade och blev ihoptrasslade upplevde maskinisterna att detta system fungerade som det skulle, även om man skulle vilja ha mer styrbarhet över trummornas orientering och in/ut-rullning. Denna lösning finns och har återkopplats för eventuell vidareutveckling.

Det som ställdes mot kabeltrummorna var en ställning för hantering av kabel utan kabeltrumma, se kapitel 6.11 för bilder och mer information, där kommentaren från maskinisterna var att dom skulle kunna få det att fungera, men att det krävde mer träning än för trummorna. Man var dock överens om att det är mycket bättre än att bara ha kabel liggande på backen, då man då måste vara två personer för att backa tillbaka maskin, en som kör maskin och en som drar tillbaka kabel. Slutligen testades det mindre mobila energilagret, designat för att göra förflyttningar mellan arbetsuppgifter inom arbetsplatsen, samt till tex verkstad och tvätthall. Detta var testad med stor framgång. Ur maskinistens perspektiv så "bara funkade det, inga konstigheter", men det var ur arbetsplatsledningens perspektiv detta är en förlösande komponent i systemet. Plötsligt återfick maskin en del av den förlorade flexibilitet som man bytte bort i och med bytet från diesel till nätansluten maskin, med en komponent som kan delas mellan alla materialhanterare på arbetsplatsen. Idag löses detta med att köpa till ett påhängsdieselelverk på varje maskin, vilket inte är ekonomiskt eller möjliggör nollemission.

**Sammantaget** kan projektet konkludera att så länge viljan och öppenheten för förändring finns, och anpassningsförmågan utvecklas gemensamt, i hela värdekedjan, från maskintillverkare till hela slutanvändarledet så kommer de nya emissionsfria maskinsystemen att fungera, även om det kräver noggsammare planering med längre planeringshorisont, och om systemen fungerar i en sådan miljö blir acceptansen i sin natur hög.

**Även gap-analys ska levereras för att tillse att om någon punkt i de elektrifierade maskinlösningarna ej uppnår kundkrav, ska detta gå in i utvecklingen av nästa generation fossilfria arbetsmaskiner.**

På grund av att testen utfördes med prototyper i olika steg i utvecklingen har återkopplingen varit stor, och väldigt bra för fortsatt utveckling av maskinsystemen. Detta kan gälla luftkonditioneringsystem, användargränssnitt, reglering av vissa funktioner på maskin osv. som inte varit fullt utvecklade på prototyperna, men som tillverkaren redan har i plan att färdigställa. Dock har det även framkommit svagheter som tillverkaren inte identifierat, det störst är värmebyggnaden i batteripacket i lastmaskin, men även vissa svagheter i de automatiserade laddsystemen har återkopplats till respektive tillverkare. I sin helhet har projektet gjort stor nytta med återkoppling till utveckling av framtida emissionsfria maskinsystem, och framför allt i arbetssättet hur dessa maskinsystem bör sättas upp för att de systemet sin fulla potential, och därmed chans att lyckas i given arbetsprocess.

## 6.9 AP9 Stödsystem

**Rapport med gap-analys ska levereras för att tillse att om någon punkt i de elektrifierade systemlösningarna ej uppnår kundkrav, ska detta gå in i utvecklingen av systemlösningar för nästa generation fossilfria arbetsmaskiner.**

Detta kapitel avser att beskriva dagens systemlösningar för anläggningsmaskiner och det gap som finns för att uppnå kundkrav i och med övergången till nästa generations fossilfria arbetsmaskiner. Gapet beskrivs i form av idéer till faktiska lösningar för förare, projektledare och andra intressenter ur ett slutanvändarperspektiv.

## **Dagens systemlösningar**

Nuvarande strategi för utveckling av tjänster innebär ofta fokus på förarstöd. Tjänsterna inriktar sig på maskinoperatören i en välkänd miljö och har fokus på att öka bränsleeffektivitet och produktivitet. Dagens maskin- och systemlösningar har framför allt utvecklats för att optimera prestanda och kostnadseffektivitet i de specifika arbetsmoment operatören och maskinen deltar. Med omställningen till fossilfria anläggningsmaskiner tillkommer utmaningar för att bibehålla produktivitet med de begränsningar de nya maskinerna kommer med. För att brygga övergången till nästa generations fossilfria maskiner behövs tjänster vars syfte är att ytterligare stötta operatör, projektledare och andra intressenter.

Produktivitetstjänster för anläggningsmaskiner kan till exempel vara inbyggda vågsystem med lastguidning, arbetsorderhantering och däcktrycksövervakning. Dessa produkter och tjänster utgår ifrån maskinen och att stötta den individuella operatören men kopplar även mot lösningar på systemnivå. Tjänster som fjärrövervakning av arbetsförloppet och maskindatainsamling möjliggör realtidsövervakning och underhållsprognoser för att minimera driftstopp direkt från kontoret.

Ett annat tydligt fokus för utveckling av tjänster och produkter är säkerhetsrelaterade lösningar. Dessa kan innebära till exempel kollisionsvarningssystem eller automatisk hastighetsbegränsning. Även dessa har utgått ifrån individuella maskiner men går mot kompletta arbetsplatser med till exempel fjärrövervakning. Säkerhet kommer fortsätta vara ett tydligt fokusområde och ett där fossilfria anläggningsmaskiner tillkommer med nya utmaningar.

Många av tjänsterna används idag som arbetsverktyg under arbetsdagen och konsumeras till exempel via skärm i maskinens hytt eller via applikationer på datorer och surfplattor.

### **Systemlösningar för elektrifierade arbetsplatser**

Omställningen till fossilfria anläggningsmaskiner och elektrifierade arbetsplatser ställer krav på nya eller förändrade systemlösningar. Arbetet med att identifiera och utvecklas dessa pågår och behoven har här kategoriserats baserat på olika slutanvändare och tekniska lösningar.

Följande kategorier har identifierats:

- Optimering av arbetsplats
- Arbetsorderhantering och schemaläggning
- Visualisering av arbetsplats
- Användning av elektrifierade maskiner
- Fjärrövervakning och -styrning av maskiner
- Säkerhet

Gemensamt för tjänster i dagens arbetsplatser och för de elektrifierade arbetsplatserna är att de utgår ifrån maskinernas grundläggande syfte och hur det kan utföras så effektivt som möjligt. Det finns även i båda exemplen överlapp mellan de individuella tjänsterna och för att uppnå kundkraven behöver kompletta lösningar skraddarsys efter varje arbetsplats och -moment.

### **Optimering av arbetsplats**

Simuleringsverktyg för att beräkna behov av maskiner baserat på önskad produktivitet har funnits länge. Verktygen ger förslag på vilken typ av maskiner, storlek på de maskinerna och vilka redskap som behövs. De kan även planera saker som vägar för dumprar att ta när de fraktar material baserat på till exempel nyttolast, vägarnas lutning och distans.

Nästa generations fossilfria anläggningsmaskiner kommer i vissa tillämpningar inte kunna ersätta motsvarande maskinstorlek och bibehålla samma produktivitet över en arbetsdag. På grund av att större del av dagen jämfört med idag kommer gå åt till laddning jämfört med påfyllning av bränsle kan drifttiden för varje maskin bli lägre vilket leder till lägre produktivitet. Detta kommer förändra förhållandena för hur maskiner matchas ihop i arbetssegment och den kompetens som finns hos projektledare och andra som planerar arbetsplatser är inte längre aktuell. Simuleringsverktygen är ett bra sätt att hantera denna brist men de behöver justeras.

Omställningen till elektrifierade arbetsplatser innebär inte bara förändring av maskinerna utan även vad gäller infrastruktur. Personer ansvariga för att planera infrastrukturen för arbetsplatsen går från att idag placera bränsletankar och schemalägga leveranser av bränsle till att behöva beräkna behov av laddare, total effekt till arbetsplatsen och lastbalansering. De simuleringsverktyg som idag används för att underlätta planeringen behöver därför uppdateras även för denna typ av planering. Vilken typ av laddare, behov av fasta batterier och var allting ska placeras är parametrar som inte ingår i dagens planering.

### **Arbetsorderhantering och schemaläggning**

Planering och schemaläggning på arbetsplatser har redan gått från traditionella papper och pennametoder till att använda digitala verktyg men kommunikation och möjlighet till uppföljning är fortfarande relativt oförändrat. Kommunikation mellan maskiner och arbetsledare sker ofta via kortvågsradio där arbetsordrar muntligt beskrivs och uppföljning av projekt görs i retrospekt, ofta i form av veckovis sammanställning.

Digitala tjänster har på sista tiden försökt underlätta arbetsorderhantering och schemaläggning då kravet på produktivitet fortsätter att öka. När de batterielektriska maskinerna ska ingå i arbetet ställs ytterligare krav på stöd vad gäller till exempel:

#### **Schemaläggning av laddning**

Då de första batterielektriska maskinerna kommer ha krav på både laddning under raster och när tillfälle ges kommer operatörerna behöva stödfunktioner som underlättar planering. Vilken laddare som ska användas, vilken effekt maskinen bör laddas med och till vilken batterinivå är alla aspekter som idag inte behöver beaktas och som bidrar till en komplexitet som ökar ju flera maskiner som arbetar på platsen. Lösningar i form av manuell eller automatisk bokning av laddare och tydlig vägledning direkt till föraren behövs för att maximera maskinernas drifttid.



*Figur 19 - Digitala arbetsordrar direkt till förarens HMI*

## Laddnings- och effektplanering på systemnivå

Laddning av anläggningsmaskiner ställer stora krav på tillgänglig ingående effekt på arbetsplatsen, någonting som kan vara svårt att tillgå. För att undvika effektspikar vid tillfällen när flera maskiner behöver laddas samtidigt behövs lösningar som lokal effektlagring och digitala tjänster som förutser effektbehov på systemnivå och därefter kan planera arbete och laddning.

## Arbetsorderhantering baserat på nuvarande batterinivå

Maskinernas längre tid för laddning än motsvarande för påfyllning av bränsle innebär att arbetsordrar behöver planeras baserat på maskinerna batterinivåer, se Figur 19. Förarna bör kunna avsluta varje arbetsmoment utan att behöva avbryta för laddning för att maximera produktivitet. Arbetsmoment där två eller flera maskiner arbetar i kombination ställer extra krav på att de inte avbryts för att en av maskinerna behöver laddas då det kan skapa driftstopp för dem alla.

Förarstöd i form av digitala tjänster som kan förutse effektbehovet för varje inkommande arbetsorder och därefter schemalägga dem efter deras prioritet och optimalt laddningsmönster behövs. En typisk arbetsorder för anläggningsmaskiner innebär till exempel förflyttning av en bestämd mängd material och kan i regel kopplas till ett effektbehov.

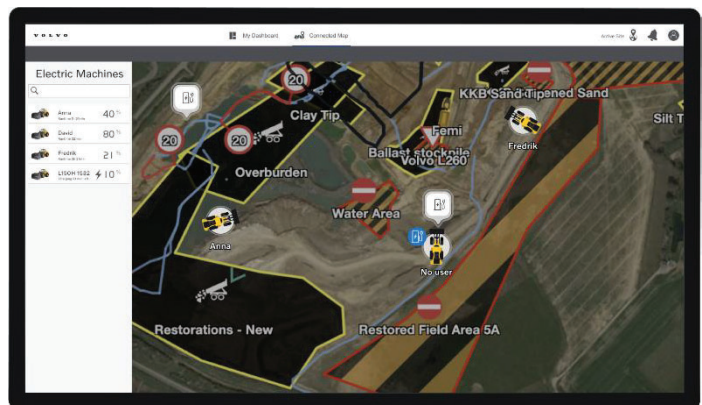
## Visualisering av arbetsplats

Omställningen till elektrifierade arbetsplatser kommer innebära att den geografiska arbetsplatsen kommer ändras. Viktiga punkter på en arbetsplats som till exempel plats för tankning kommer bytas ut mot elektriska motsvarigheter medan helt nya tillkommer. Dagens karttjänster för visualisering, se Figur 20, av arbetsplatser fokuserar på att markera områden för in- och utlastning av material, visa vägar, hastighetsgränser och förbjudna zoner, alla vilka kommer vara fortsatt viktiga på framtidens arbetsplatser.

Identifierade förändringsbehov av nuvarande karttjänster för arbetsplatser är till exempel:

### Laddplats inkl. status för laddare

Nuvarande arbetsplatser har i regel en plats för att fylla på bränsle medan de elektrifierade motsvarigheterna kommer kräva flera laddstationer och laddare. När laddning av anläggningsmaskinen blir en aktivitet som måste utföras flera gånger per dag blir planering av stoppen av större vikt. Avstånd och väg till närmaste laddare får stor påverkan på maskinernas tillgängliga tid och nästa generations anläggningsmaskiner kommer behöva tjänster som underlättar beslutsfattande.



Figur 20 - Exempel på en visualisering av en arbetsplats

Tid för laddning kommer även den vara betydligt längre än dagens påfyllnad av bränsle och den potentiella effekten av att stå i kö blir därmed större. Lösningar för att stötta föraren kommer därför behöva innehålla laddares status och förväntade tid till tillgänglighet nära till hands.

## Visualisering av högspänningskablar

Elektrifierade arbetsplatser kommer i mångt och mycket byta ut dagens bränsletankar på diskreta platser mot högspänningskablar som sprider sig över hela siten. Kablarna kan vara fasta installationer för till exempel laddare och el-centraler men kan även finnas för maskiner som är kontinuerligt kopplade till elnätet. Det kommer vara av vikt att alla på arbetsplatsen känner till placering av båda typerna av kablar men de senare är en större utmaning då deras utbredning kan komma att ändras över dagar, veckor och månader.



För att underlätta för personer som kommer arbeta och vistas på de elektrifierade arbetsplatserna behövs digitala tjänster som visualiserar kabeldragning. Dessa tjänster bör varna om till exempel en maskin är nära eller på väg mot en högspänningskabel och bör vara uppdaterad i realtid på både kablar med fast installation och också göra bedömningar om var kablar för nätanslutna maskiner är.

### **Användning av elektrifierade maskiner**

Redan idag är föraren av anläggningsmaskiner den största faktorn i att avgöra dess effektivitet och mycket tid och resurser läggs på utbildning och stötning.

Utbildning av förare har på senaste tiden kompletterats av tjänster vars syfte är att öka produktivitet och minska antalet driftstopp. Sådana tjänster kan i realtid ge föraren respons på hur användningen av maskinen bör justeras för att optimal användning. Det kan till exempel ske genom att poängsätta moment av användningen (gamification) eller genom att i realtid tipsa om ändrat beteende eller maskininställningar baserat på nuvarande arbetsmoment.

När konventionella maskiner snart byts ut mot elektrifierade fordon kommer denna typ av tjänst vara av ytterligare stor betydelse. Beteenden som bör undvika för maskiner med förbränningsmotor, till exempel tomgångskörning, har inte längre samma tydligt negativa påverkan och vice versa.

Övergången från dagens maskiner till nästa generations kommer ske över en längre tid och digitala tjänster kan vara till god nytta för att stötta en miljö där fordon av olika drivsystem kommer samsas på samma plats och där förare kommer behöva byta från en typ till den andra. På samma sätt kan de underlätta i en situation där många förare kommer gå från en mångårig vana av en typ av användningssätt till ett annat.

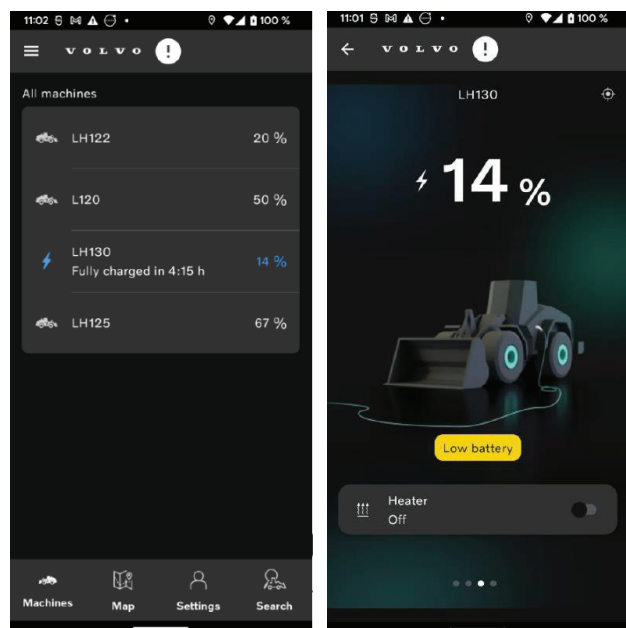
Även stöd för att utbilda och återkoppla till maskinföraren gällande laddning av maskiner kommer vara viktigt. Dagens maskiner kräver ingen analys för hur och när bränsle bör fyllas på men för att öka livslängd och minska driftstörningar av batterielektriska maskiner bör laddning ske kontrollerat. När och hur en maskin laddas kommer föraren ha stor inverkan på och därför behöver de förstå hur olika parametrar som till exempel snabb- och långsam laddning och laddningsnivåer påverkar.

### **Fjärrövervakning och -styrning av maskiner**

Behovet för maskinförare att på distans kunna se status av maskiner och styra maskinfunktionalitet kommer öka med transformationen till batterielektriska maskiner. En batterielektrisk maskin kommer behöva laddas mellan arbetsskift och föraren behöver veta vad det är för status på laddningen och batterinivån på maskin är utan att det krävs fysisk närvaro i eller vid maskinen.

En batterielektrisk maskin kräver dessutom flera typer av möjligheter till fjärrstyrning av maskinfunktionalitet. Till exempel är temperaturen på batterielement en viktig parameter för att maximera maskinens totala produktivitet och tillgängliga kraft. Därför behöver maskiner i regel förkonditionering av batterierna i form av temperaturökning eller -sänkning.

Genom att tillhandahålla en tjänst där förare och annan personal på arbetsplatsen kan på distans läsa av maskinerna status och kunna schemalägga och aktivera fjärrstyrning av förkonditionering kan onödiga driftstopp undvikas och produktivitet optimeras, se Figur 21. Liknande tjänster finns idag både till person- och lastbilar.



Figur 21 - Mobilapp för fjärrövervakning och -styrning

## Säkerhet

Säkerhetsprodukter och -tjänster för anläggningsmaskiner är och kommer fortsätta vara av högst prioritet. Säkerhetsaspekten ingår därför i alla delar av arbetet som utförs och går att finna i alla ovan identifierade kategorier där nya lösningar behövs.

Utveckling av existerande eller helt nya lösningar för elektrifierade maskiner och arbetsplatser kommer vara avgörande för att bibehålla höga säkerhetsnivå. Litium-jon baserade batterier och högspänningselektricitet kommer vara nya potentiella källor till fara och stöd behövs för att undvika olyckor och mitigera deras potentiella effekt.

Uppkopplade maskiner och utrustning som kontinuerligt skickar status gör att eventuella olyckor eller faror kan rapporteras automatiskt till berörda som kan ta handling därefter. Genom att kontinuerligt övervaka och positionera kan till exempel batterier snabbt lokaliseras och säkras i händelse av brand, kollision, översvämning eller liknande.

## 6.10 AP10 Utvärdering av affärsmodeller och dess miljöeffekter

### *Beslutsstöd med LCC samt förslag på affärsmodell som beaktar cirkulär ekonomi.*

Ett delmål i AP10 har varit att med hjälp av LCC-analyser utvärdera effekterna av cirkulära och elektrifierade affärsmodeller ur olika användares perspektiv, dvs. den finansiella påverkan. Dessa analyser inkluderar både kostnadsförändringar och framtida ingående och utgående kassaflöden. Analysen syftar till att ge en tydligare bild av vilka driv- och motkrafter olika aktörer kan ha för att ändra och anta mer hållbara och cirkulära affärsmodeller. Fokus har varit på att förbättra affärsmodellens hållbarhet och lönsamhet över tid. Resultatet är en modell som kan användas som beslutsstöd med LCC via utvärdering av cirkulära affärsmodellens finansiella effekter utifrån olika användares perspektiv.

Den finansiella påverkan som undersökts har inkluderat kostnader, intäkter, erbjudandets framtida kassaflöden, risker och osäkerheter, samt hinder och drivkrafter för kostnad- intäktsgenerering. Förändringar i aktiviteter och erbjudande har identifierats, för samtliga livscyklifaser. Förändringar i kostnader och intäkter har kartlagts och/eller uppskattats/estimerats, till exempel materialkostnader samt kostnader och intäkter relaterade till erbjudandets utformning.

Metodologiskt har modellen utvecklats i nära samarbete med VCE i en aktionsforskningsliknande process. Processen har varit indelad i tre faser. Inledningsvis har vi deltagit i projektmöten för att förstå företagets elektrifieringsprocess, därefter har vi haft semistrukturerade intervjuer samt workshops för att förstå och hjälpa till att utveckla elektrifierade cirkulära affärsprocesser samt för att tillsammans analysera hur den nya affärsmodellen påverkar kostnadsstrukturen samt framtida ingående och utgående kassaflöden. Slutligen har vi haft workshops för att demonstrera, utveckla och finjustera modellen och dess bakomliggande antaganden. Se Tabell 1, nedan för en förteckning av vilka som har deltagit i datainsamlingen samt i forskningsprocessen från VCE.

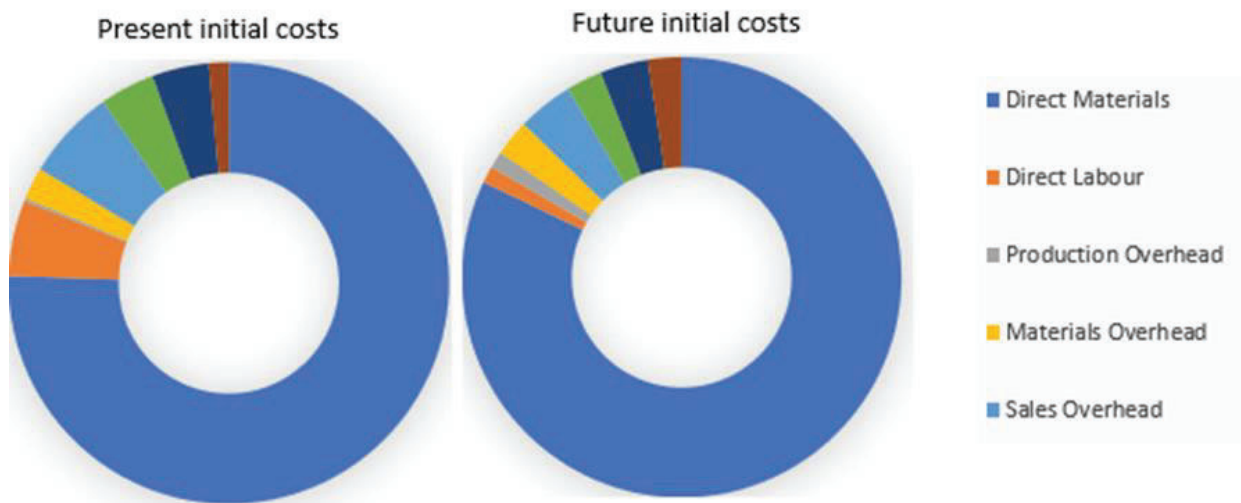
Phases in action case study	Data collection	Participants from the company
Understanding phase	16 interviews (duration 60 min) 12 project meetings (in all phases)	Head of Electric solution sales Head of business control for service and solution Head of sales and management of energy solutions Product development researcher

<b>Action phase</b>	5 workshops (duration 90 min)	Head of Electric solution sales Head of Assets as Service Head of business control for service and solution Chief project manager Product development researcher
<b>Refinement phase</b>	4 workshops and 3 follow-up meetings (duration 60 min)	Head of Electric solution sales Head of Assets as Service Head of business control for service and solution

*Tabell 1: Datainsamling*

I projektet har det utvecklats en LCC-baserad modell som jämför ett cirkulärt elektrifierat erbjudande med ett linjärt elektrifierat erbjudande. Den cirkulära affärsmodellen baseras på 3 cykler för maskinen (4 + 4 + 2 år), dvs en livscykel på totalt 10 år. Översyn och renovering av maskinen sker mellan cyklerna. Den elektrifierade arbetsmaskinen som ingående data bygger på är EC230 Electric (elektrisk bandgrävmaskin). LCC-modellen är dock generisk, så med uppdaterade inputsdata (initial kostnadsstruktur, månatliga inbetalningar från kund mm) är den även tillämplig för andra elektriska arbetsmaskiner. I modellen ingår två olika batterigenerationer med olika kostnader och prestanda, benämnda som första generationen 2022 samt andra generationen 2025. Dessa två batterigenerationer kan också jämföras och analyseras i LCC-modellen. Beroende på hur hårt maskinen används under livscykel krävs även olika antal uppgraderingar av batteriet. I det cirkulära erbjudandet som betalas månadsvis av kund går det i modellen att välja på olika användningsgrader (hård eller medium), olika laddningsmöjligheter (fast laddstation eller rörlig), olika batterigenerationer samt olika tillval.

Första steget i utvecklandet av en LCC för en cirkulär affärsmodell är att analysera förändringen i kostnadsstruktur. Kostnadsstrukturen förändras i och med övergången till en elektrifierad cirkulär affärsmodell. I denna analys jämförs kostnadsstrukturen för linjär med cirkulär försäljning samt även mellan de två batterigenerationerna. Initiala kostnader kan gå både upp och ner vid införande av en cirkulär affärsmodell samt via utvecklingen mellan de två batterigenerationerna. Figur 22 nedan visar på förändring av kostnadsposter mellan de två batterigenerationerna. Observera att det är den relativa förändringen mellan posterna. Den totala kostnaden för de framtida initiala kostnaderna är lägre än dagens kostnader. Exempelvis är produktionskostnaderna (Direct labour) stora idag i och med att företaget är i en utvecklingsfas med relativt små volymer och mycket handpåläggning i produktionen. Ett annat exempel är direkt material som förväntas bli något lägre framöver (batteriet), men kommer även i framtiden vara den klart dominerade kostnadsposten för elektrifierade arbetsmaskiner.



Figur 22, Förändring i kostnadsstruktur för en arbetsmaskin med dagens batterigeneration (present) jämfört med den andra generationens (future).

För prissättning av rimliga framtida "rental fees" användes som utgångspunkt en prissättningsmodell samt erfarenheter från ett pilotprojekt av elektrifierade arbetsmaskiner inom VCE som heter Ottfjället.

I Tabell 2 återfinns LCC-modellens ingående kassaflöden. Det är dessa framtida ingående kassaflöden som nuvärdesberäknas och genererar ett positivt nuvärde.

Rental fees machine + battery
Rental fees charging solution
GPS software (subscription fee)
Tax shield depreciation machine
Tax shield depreciation battery
Residual value machine
Residual value battery

Tabell 2: Framtida ingående kassaflöden i LCC-modellen.

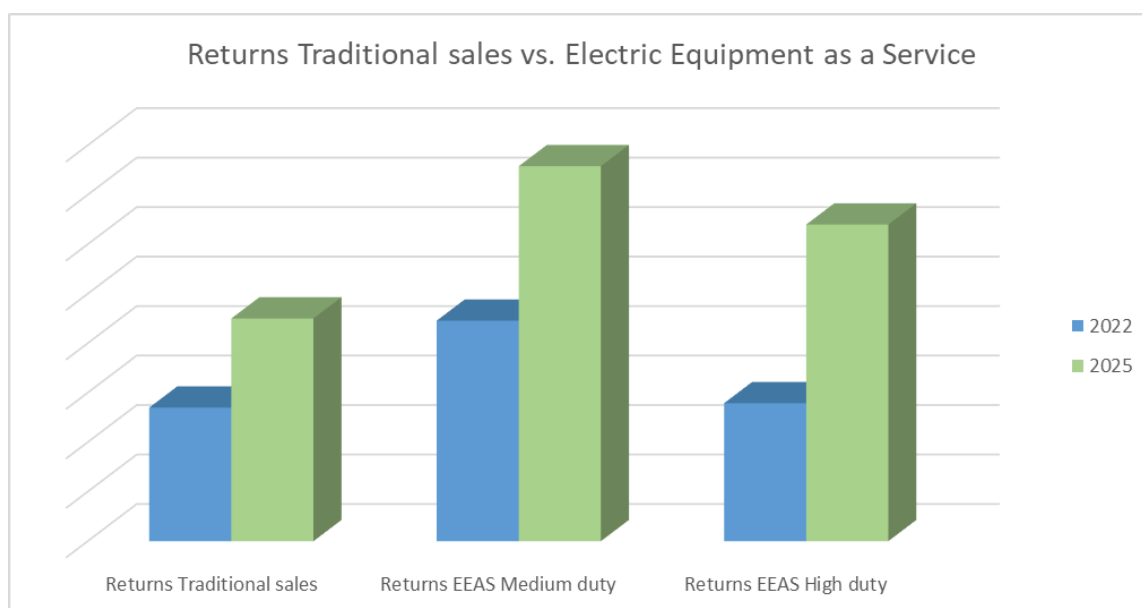
I Tabell 3 nedan återfinns LCC-modellens utgående kassaflöden. Det är dessa framtida utgående kassaflöden som nuvärdesberäknas och genererar ett negativt nuvärde. Det positiva nuvärdet reducerat med det negativa måste minst täcka de initiala kostnaderna för att affärsmodellen/erbjudandet ska generera ett positivt nuvärde. Bakom varje post för ingående och utgående kassaflöden finns antaganden, principer och beräkningar baserade på diskussioner och intervjuer.

PDI + logistics
Financial cost machine (4%)
Financial cost battery(4%)
Insurance machine (2%)
Insurance battery (2%)
Transaction costs (administrative cost)
Customer support costs

Maintenance, repair, and spare part for the machine (price paid to dealers)
Maintenance, repair, and spare parts battery (price paid to dealers)
Battery upgrade/replacement
Refurbishment of the machine
Major Overhaul
Availability obligation (risk)
Monitoring (usage data)
End of life management cost/take back costs

Tabell 3: Framtida ingående kassaflöden i LCC-modellen.

Resultaten från LCC-modellen visar givet inputvariabler och antaganden att ett cirkulärt elektrifierat erbjudande har potential att avkasta mer än det traditionellt linjära. I och med att kostnadsstrukturen för den andra batterigenerationen är lägre så kommer även den linjära affärsmodellen generera en högre vinst 2025 jämfört med 2022. När det gäller det cirkulära erbjudandet så påverkas avkastningen av hur hårt arbetsmaskinen utnyttjas under användningsfasen (användningsgrad). Används maskinen hårt så kommer, för den första batterigenerationen, både den linjära och den cirkulära modellen generera likartad vinst. För den andra batterigenerationen kommer den cirkulära modellen generera högre vinst. Vid medel-användning av arbetsmaskinen, så kommer den cirkulära affärsmodellen oavsett batterigeneration prestera klart bättre jämfört med den linjära modellen, se **Error! Reference source not found.** Beräkningarna är baserade på ett avkastningskrav på 10 %.



Figur 23, Jämförelse mellan den linjära och den cirkulära affärsmodellens prestation samt jämförelse mellan den cirkulära affärsmodellens prestation baserad på maskinens användningsgrad samt batterigeneration

Kundperspektivet visas i modellen på flera sätt. Erbjudandet kan inkludera olika maskiner med olika kapacitet, extra tillbehör, olika generationers batterier samt olika lösningar för laddning beroende på kundens behov. Utöver den fysiska tillgången, så kan även ett paket med möjliga tjänster adderas i erbjudandet såsom, initial installation, rådgivning, utbildning, kundsupport, reparation och underhåll. Därmed måste kundens behov klargöras och tillfredsställas redan vid dag ett så att ett pris kan sättas för affärsmodellens erbjudande. Allt ovanstående kan hanteras i den framtagna LCC-modellen. Vidare kan LCC-modellen inverteras och användas utifrån ett kundperspektiv. Allt annat lika så kommer ett positivt nuvärde för tillverkaren generera ett lika stort negativt värde för kunden. Beroende på kundens situation kommer dock vissa parametrar att förändras, vissa parametrar i affärsmodellen och i LCC-

modellen värderas olika mellan tillverkare och kund samt att olika skattesatser mellan organisationerna medför att båda parter potentiellt kan erhålla positiva nuvärden.

Även om LCC-modellen möjliggör en analys utifrån ett kundperspektiv så behövs fortsatt forskning. Det behövs mer analys som fokuserar på ett kundperspektiv och inkluderar kundens perspektiv än mer i utvecklandet av LCC-modellen. Den föreslagna LCC-modellen är så pass generisk att den går att använda för fler varianter av elektriska arbetsmaskiner än EC230 (till exempel EW240 och L120H). Den bör även gå att använda för likartade industriella erbjudanden. För att validera modellen ytterligare behövs dock mer data från andra företag, och industrier samt data som är baserad på fler cirkulära affärsmodeller.

LCC-modellen har även utvecklats med ytterligare scenarier i sluttampen av EMH-projektet. Scenarierna bygger på de batterilösningar som utvärderas i LCA-analysen för arbetsmaskin EW240-MA. I LCC-modellen analyserar vi scenarier med samma batterilösningar fast för arbetsmaskin EC230. Se tabell 6 nedan under avsnitt 10.2 för en utförligare beskrivning av scenarierna. Alternativ A är vad som utvärderas i LCC-modellen ovan med olika batterigenerationer samt användningsgrad. Alternativ B är en kombination av nätanslutning via kabel samt användandet av 50 % inbyggda batterier (2x90 kWh). Batteriet används för förflyttning mellan arbetsstationer. I alternativ C delar 5 arbetsmaskiner på en flyttbar powerbox (som används för förflyttning mellan arbetsstationer, service, tvätt mm) samt nätanslutning av kabel. Powerboxen motsvarar 50 % av ett fullt batteripack i en arbetsmaskin samt att kapaciteten delas på fem maskiner. Därmed allokeras 10 % av batteriet till en arbetsmaskin i alternativ C. Alternativ B och C bygger båda på 2025 års batterigenerationer och jämförs med batterigeneration 2025 för alternativ A (4x90 kWh).

Jämfört med alternativ A, där batteriet används i både medium och hårt arbete, så är användningsgraden för alternativ B och C mycket lägre i och med att batteriet endast används för förflyttning. Livslängden för det halva batteripaketet i alternativ B blir mycket långt relativt alternativ A. Livslängden för alternativ C blir likartad med medium-användning för alternativ A i och med att det är fem arbetsmaskiner som delar på ett halvt batteripaket.

Scenariernas olika användningsgrader, batteriernas livslängd, storlek på batteripaket, antal arbetsmaskiner som delar på ett batteripaket påverkar var för sig och tillsammans ett flertal kassaflöden i LCC-modellen. Först och främst påverkas prissättningen beroende på andel batteripaket som återfinns/allokeras till arbetsmaskinen, vilket påverkar de "rental fees" som kunden är beredd att betala (prissättningsmodellen får förstås stor påverkan på olika alternativs lönsamhet i slutändan). I denna analys är avgiften i alternativ B och C linjärt reducerad jämfört med alternativ A beroende på reduktionen av andel batteripaket (och dess ursprungliga relation mellan maskin och batteri).

Följande kassaflöden i LCC-modellen påverkas i scenarierna B och C jämfört med det ursprungliga scenariot A:

Rental fees machine + battery
Tax shield depreciation battery
Residual value battery

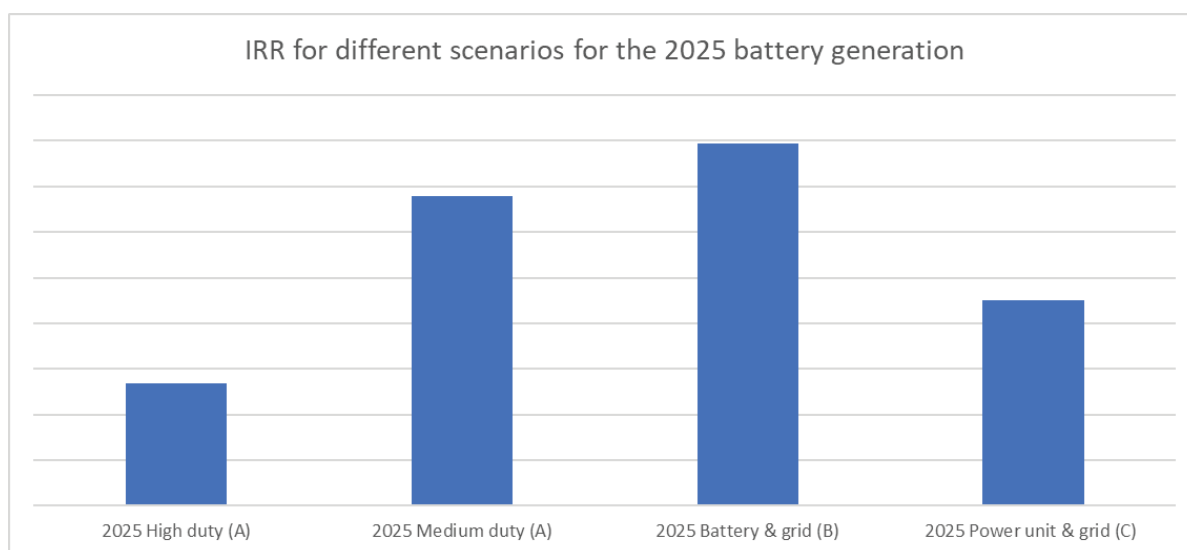
*Tabell 4: Framtida ingående kassaflöden i LCC-modellen som påverkas av scenario B och C.*

Financial cost battery (4 %)
Insurance Battery (2 %)
Maintenance, repair, and spare parts battery (price paid to dealers)
Battery upgrade/ remanufacturing
Availability obligation (risk)

*Tabell 5: Framtida utgående kassaflöden i LCC-modellen som påverkas av scenario B och C.*

Resultatet av analysen med den uppdaterade LCC-modellen visas i Figur 23 nedan. Diagrammet visar lönsamheten (IRR) för de olika scenarierna (baserat på ett avkastningskrav på 10 %). För att inte avslöja affärshemligheter är lönsamhetsnivåerna på y-axeln borttagna. Det är dock intressant att notera att skillnaden mellan de fyra olika scenarierna är cirka en procentenhet per scenario, dvs mellan det mest lönsamma och det minst lönsamma scenariot skiljer det cirka 3 procentenheter. Mest lönsamt är scenario B med ett halvt inbyggt batteripaket samt nätanslutning via kabel. Scenario C med delad powerbox samt nätanslutning visar sig vara mer lönsam än en helt elektrifierad arbetsmaskin med hård användning men mindre lönsam än om maskinen används i en medelapplikation.

En förklaring till att scenario B är mest lönsamt är att det halva batteripaketet bibehåller så pass mycket restvärde på grund av den låga användningsgraden. Vidare bibehålls en stor del av skatteskölden via bibehållet ägande av batteriet på balansräkningen.



Figur 23. Jämförelse i lönsamhet (IRR) mellan scenario A med medium och hög användningsgrad, scenario B samt scenario C.

Vad som ej är med i analysen är kostnad för kabelvinda och montering i scenario B & C. Det finns dock möjlighet att i LCC-modellen lägga kostnadsposten under till exempel "additional equipments". Ett tillägg av kostnadsposten innebär att scenario B fortsatt skulle vara det mest lönsamma alternativet.

### **Beslutsstöd med livscykelanalys (LCA) - Miljöpåverkan**

Ett andra delmål i AP10 är att undersöka miljöpåverkan av att elektrifiera mobila arbetsmaskiner sett i ett livscykelperspektiv. Denna utvärdering genomförs med metoden livscykelanalys (LCA) som är en standardiserad metod för att uppskatta miljöpåverkan av en produkt eller tjänst, från utvinning av råmaterial, materialproduktion, produkttillverkning och produktanvändning till avfallshantering. Genom att vidga systemperspektivet förbättras förståelsen för hur delprocesser i ett system påverkar de övergripande resultaten [12]. I denna studie är det primära syftet att jämföra olika lösningar för tre arbetsmaskiner med olika applikationer, EC230, EW240-MH samt L120H. De tre applikationerna skiljer sig åt med hänseende till systemgränser, inkluderade parametrar och metod för att göra utvärderingen.

För utvärderingen av EC230 används den av VCE utvecklade metoden för att beräkna klimatavtryck mätt i mängd CO<sub>2</sub>. För livscykelanalysen av L120H samt EW240-MH används programmet SimaPro Professional version 9.4.0.2 [13], inventeringsdatabasen Ecoinvent 3.8 för att beräkna resursbehov och emissioner [14] samt ReCiPe 2016 Midpoint (H) för att uppskatta den miljöpåverkan som resursanvändningen och emissionerna leder till [15]. De påverkans-kategorier som ingår i studien av

dessa två maskiner är global uppvärmning (GWP), försurning (AP), övergödning (EP), resursanvändning av mineraltillgångar (ADP-M) samt resursanvändning fossila resurser (ADP-F). Systemgränserna skiljer sig åt, där fokus för EW240-MH är på batteriet och olika lösningar för elektrifiering medan det för L120H är hela maskinen som ingår. De livscykelphaserna som ingår i båda fallen är desamma, dvs utvinning, produktion, användning och sluthantering. Data har samlats in från vetenskapliga artiklar och rapporter, övriga rapporter, hemsidor samt direkt från VCE. Nedan presenteras ett urval av resultaten. Mer information om livscykelanalyserna av EW240-MH och L120H finns att läsa i projektrapporten “Electric material Handling – Assessment of the environmental impact of two electric material handling machines” [16].

### **EW240-MH**

Fokus i utvärderingen av EW240-MH är valet av batterilösning för att tillföra den energi som arbetsmaskinen behöver och effekten på miljöpåverkan beroende på vilken lösning som används. De tre alternativen som undersöks beskrivs i Tabell 6.

<b>Alternativ</b>	<b>Beskrivning</b>
A	Inbyggda batterier i varje arbetsmaskin som används när den är stationär samt vid förflyttning.
B	En kombination med inbyggda batterier i varje arbetsmaskin och en direkt koppling via kabel till elnätet. Batterierna används vid förflyttning och energi tillförs från nätet via kabeln när arbetsmaskinen är stationär.
C	En kombination med en direkt koppling via kabel till elnätet och en separat och flyttbar power box som delas av ett antal arbetsmaskiner. Energitillförsel från nätet via kabeln sker när arbetsmaskinen är stationär, och power boxen används när arbetsmaskinen ska förflyttas.

*Tabell 6: Alternativa batterilösningar för en EW240-MH*

Systemet som undersöks omfattar batterierna och deras livscykel och i utvärderingen jämförs dessa med varandra. Själva arbetsmaskinen ingår inte i analysen och anledningen till detta är att den, förutom batterilösningen, kan anses vara lika mellan de olika fallen med materialinnehåll samt det underhållsbehov som finns för själva arbetsmaskinen. Det innebär att det inte kommer att påverka resultatet av jämförelsen om övriga arbetsmaskinen inkluderas eller ej. Dessutom är behovet av kringutrustning exkluderat, dvs kabel för kontakt med elnätet, kabeltrummor, kabel- och distributionsskåp samt infrastruktur för batteriladdning. Detta eftersom kringutrustningen sannolikt bidrar med en betydligt mindre del av den totala miljöpåverkan som batterierna ger upphov till. Som tillägg till jämförelsen mellan de olika batteri och kabellösningarna sker en jämförelse med en arbetsmaskin som drivs med diesel. I denna jämförelse inkluderas endast själva dieselförbrukningen.

I Tabell 7 beskrivs förutsättningar i de undersökta fallen av elektrifierad materialhanterare, där även dieselalternativet finns beskrivet.

	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>Diesel</b>
Antal EW240E-MH	5	5	5	5
Antal kub batterier	20	10	2	-
Drifttimmar per EW240E-MH	20 000	20 000	20 000	20 000
El från elnätet, andel av total användning	0%	75%	95%	-
El från elnätet, MWh	0	2 918	3 700	-



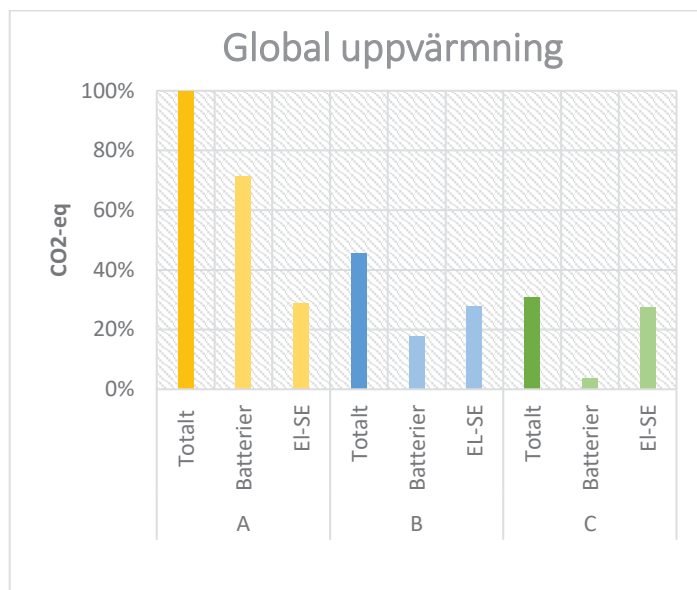
El från batterier, MWh	3 890	973	195	-
Energianvändning inkl förlust, MWh	4 094	3 942	3 900	10 290
Livslängd på batterier, antal laddcykler	1 000	1 000	1 000	-
Antal batterier under analysperioden	48	12	2,4	-

*Tabell 7: Beskrivning av de undersökta fallen av alternativa batteri- och kabellösningar för elektrifierad materialhantering med en EW240-MH.*

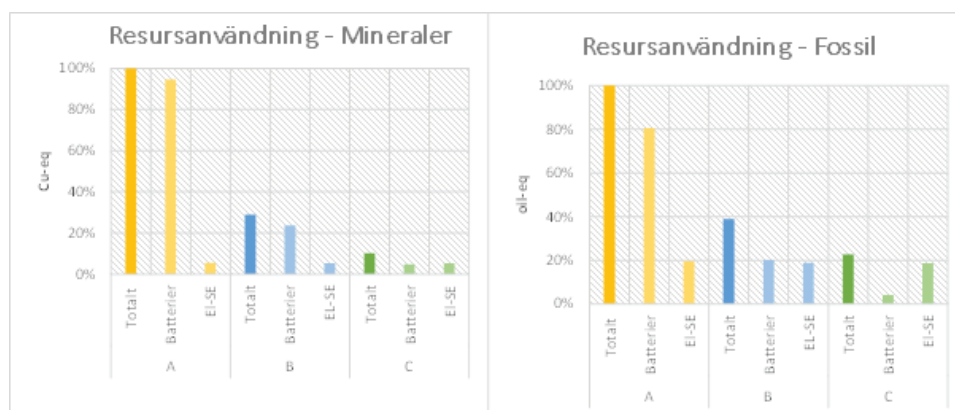
Grunden är fem arbetsmaskiner där det arbete som utförs antas vara lika i de olika fallen. Även energibehoven per timme är lika för de eldrivna arbetsmaskinerna, dvs 38,9 kWh/timme, och för den dieseldrivna är bränsleförbrukningen 10,5 l/timme. Analysperioden är, efter diskussioner med VCE, definierad till 20 000 timmar, vilket motsvarar 2 000 timmar drifttid per år i tio år. Kubbatterierna är av typen manganlaminerade lithium-ion och har ett energiinnehåll på 90 kWh och baseras på information i Dai m.fl [17]. Dessa kommer att behöva ersättas under analysperioden då batterierna kommer att degraderas till en nivå där kvaliteten gör att de inte längre passar för applikationen. Ett antagande görs att degraderingen är linjär och att ett batteri byts ut när den nått den en kapacitet som är 80% av den initiala kapaciteten. Alternativet med den helt batteridrivna arbetsmaskinen kommer att ha ett större utnyttjande av sina batterier jämfört med de andra två alternativen, som tar den mesta av elbehovet via kabel. Därför kommer fler laddcykler att behövas och batterierna degraderas snabbare i alternativ A som därför behöver ersätta relativt fler batterier än B och C under analysperioden.

Resultaten redovisas i Figur 24 till Figur 26 nedan. De illustrerar den relativa miljöpåverkan för respektive fall och miljöpåverkanskategori. Fall A, där all el till arbetsmaskinen levereras via batterier, utgör basen för jämförelsen (=100%). I figurerna kan man också se det relativa bidraget som batterierna respektive elanvändningen står för och som ses varieras inte elanvändningens bidrag till miljöpåverkan mellan alternativen. Detta är enligt förväntan då elbehovet inklusive förluster endast marginellt skiljer sig åt mellan alternativen. Den stora skillnaden återfinns i batteriernas bidrag där A, som behöver betydligt fler batterier för att lösa energitillförseln, har den absolut största påverkan på grund av detta. Det relativa bidraget ligger mellan ca. 70 till 95% beroende på miljöpåverkan. För B och C ligger detta bidrag mellan ca. 40 till 80% respektive 10 till 50%. Den miljöpåverkan som är den mest uttalade avseende detta är resursanvändning - mineraler (ADP-M), vilket beror på de kritiska råmaterial som behövs i batterierna.

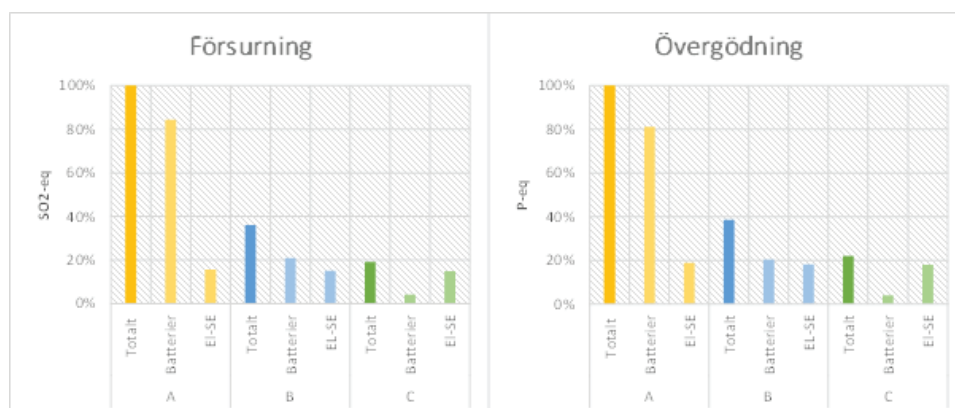
I en jämförelse mellan A, B, C och en dieseldriven EW240-MH, se Figur 27, kan man se att den eldrivna lösningen, leder till lägre miljöpåverkan i fyra av de undersökta kategorierna. Undantaget är fall A avseende övergödning. Anledningen till detta är framförallt användningen av koppar samt de material som finns i anoden. Kategorin resursanvändning - mineraler, visas inte i diagrammet eftersom alternativen med batterilösningar leder till väsentligt större miljöpåverkan än diesel. För den miljöpåverkan utgör dieselalternativet mellan 1% relativt alternativ A till 14 % relativt alternativ C.



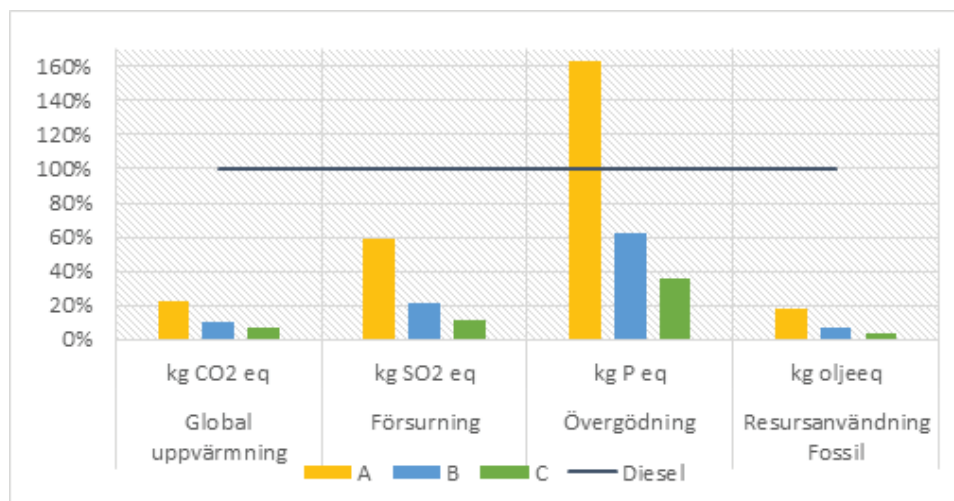
Figur 24, Relativ jämförelse av påverkan på global uppvärmning mellan de tre alternativa batterilösningarna för EW240-MH.



Figur 25, Relativ jämförelse av påverkan på resursanvändning-mineraler och resursanvändning-fossil mellan de tre alternativa batterilösningarna för EW240-MH.



Figur 26, Relativ jämförelse av påverkan på försurning och övergödning mellan de tre alternativa batterilösningarna för EW240-MH.



Figur 27. Relativ jämförelse av miljöpåverkan på global uppvärmning, försurning, övergödning och resursanvändning-fossil mellan en dieseldriven och eldriven EW240-MH.

I studien identifieras att livslängden på batterierna samt den elmix som används kan ha betydelse för resultatet. Därför genomförs känslighetsanalyser där dessa aspekter varierar i analyserna. En sammanställning av de känslighetsanalyser som studeras ses i Tabell 8.

Faktor	Antagande
Livslängd batterier, antal laddcykler	600 (kort)
	1 500 (lång)
Elmix (genomsnittlig)	Europa (EU)
	USA (US)
	Kina (CN)

Tabell 8: Antagande om variationer i batteriers livslängd och elmix i känslighetsanalyserna

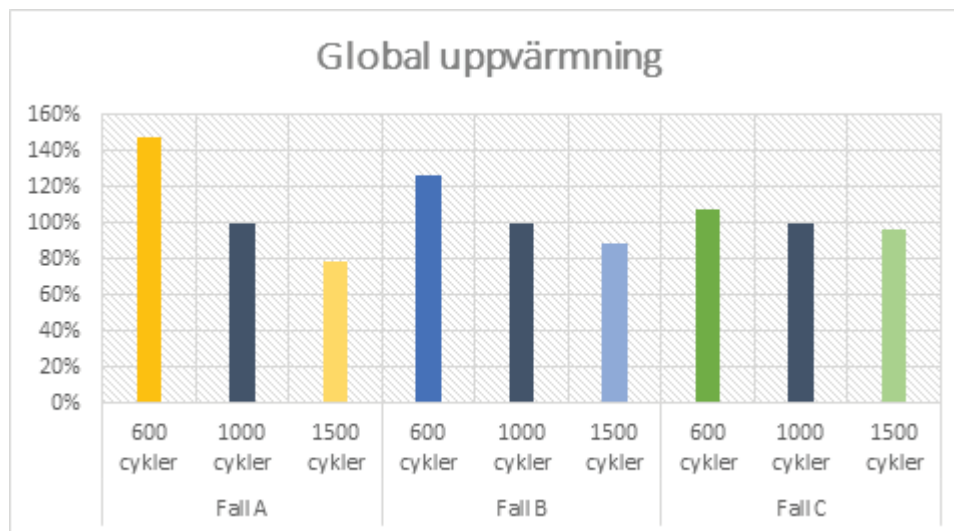
I fallet med olika livslängd på batterierna representerar den korta livslängden en situation där användningen av arbetsmaskinerna och batteriernas laddning är ogynnsamma, t.ex. snabbbladning, höga temperaturer och en djup urladdning. Den långa livslängden representerar den motstående situationen där förutsättningarna är mer gynnsamma för att bevara kvaliteten. De olika antagandena påverkar behovet av antalet batterier i de undersökta fallen, vilket sammanfattas i tabell 9.

Fall	1 000 laddcykler (basfall)	600 laddcykler (kort)	1 500 laddcykler (lång)
A	48,0	79,7	33,7
B	12,0	20,0	8,4
C	2,4	4,0	1,7

Tabell 9: Antagande om variationer i batteriers livslängd och elmix i känslighetsanalyserna

Resultaten av känslighetsanalysen avseende livslängden på batterierna kan sammanfattas med att den faktorn har störst betydelse i fall A där den absoluta miljöbelastningen i alla kategorier påverkas mer än vad den gör i fall B och C. Ett exempel avseende påverkan på global uppvärmning visas Figur 29. i Anledningen är att fler batterier behövs i fall A och de används betydligt mer än i de två andra fallen som får majoriteten av el levererad via kabel.

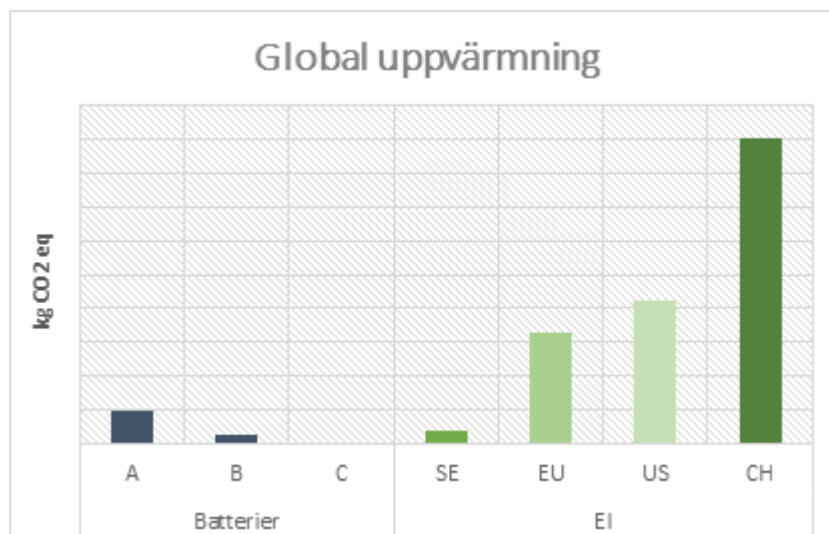
Det indikerar att ska man välja en lösning med enbart batterier på en plats där en kabellösning inte är tillämplig, samt att det då är av vikt att optimera förhållandena både vad gäller användningen av arbetsmaskinen samt hur batterierna laddas i och laddas ur.



Figur 28, Påverkan på global uppvärmning av antagande om kort respektive lång livslängd på batteriers, relativt 1000 laddcykler och för de olika fallen.

Känslighetsanalysen med olika elmixer kan representera hur olika verksamhetens miljöpåverkan kan påverkas av att den genomförs på olika geografiska platser. Den största skillnaden i de elmixer som undersöks är hur stor andel som produceras med förnybara och fossila energikällor. Den svenska elmixen består till störst del av förnybara energikällor (ca 69%) medan elmixen för EU, USA och Kina till stor del består av fossila bränslen (38%, 59% och 65%) [18]. I Figur 29 illustreras effekten på global uppvärmning av att ha verksamhet i olika länder. I figuren ses bidraget från batterierna för de tre fallen, medan elen redovisas för fall A vilket kan ses som representativt för elens bidrag i alla tre fallen. Detta eftersom elanvändningen i stort sett är densamma för A-C.

Som kan ses i Figur 29, blir elens bidrag till global uppvärmning större än batteriernas andel även i fall A när en annan elmix antas än den svenska. Anledningen är just den högre andelen fossila bränslen, där speciellt användningen av kol har en hög bidragande effekt. Liknande resultat kan ses för miljöpåverkanskategorierna försurning, övergödning och resursanvändning-fossil. Däremot spelar vilken elmix som används en obetydlig roll avseende resursanvändning-mineraler.



Figur 29, Påverkan på global uppvärmning på grund av olika elmixer.

En jämförelse görs också gentemot bidraget till miljöpåverkan vid dieselanvändning. Det resultatet visar att en elektrifierad arbetsmaskin ger lägre miljöpåverkan avseende global uppvärmning relativt en dieseldrivet alternativ, även när påverkan från batterier och el inkluderas. Undantaget är om en kinesisk elmix använd där de elbaserade lösningarna ger högre miljöpåverkan relativt diesel, mellan 36% till 58% högre beroende alternativ. För kategorierna försurning, övergödning och resursanvändning-fossil varierar resultaten något mellan de undersökta alternativen, men det är generellt sett så att kinesisk elmix leder högre miljöpåverkan relativt andra elmixer, med undantag för övergödning. Det samma gäller relativt diesel där en elmix likt den kinesiska har högre eller i det närmsta lika stor påverkan som diesel.

### L120H

Miljutvärderingen för hjullastaren L120H omfattar en arbetsmaskin med dess produktion, drift och underhåll, samt sluthantering. Syftet är att jämföra miljöbelastningen för en L120H med förbränningsmotor (diesel) och en konverterad L120H som drivs med el via lithium-ion batterier. Den funktionella enheten är användning av en L120H under 20 000 drifttimmar, ekvivalent med 10 års livslängd med 2 000 timmars drifttid per år. Varje produktsystem utgår från en stycken hjullastare och dess användning under den angivna drifttiden. I fallet med L120H EI ingår även batteriladdare och då den antas ha en längre livslängd än den undersökta perioden så inkluderas en andel av den i beräkningarna, i detta fall ca 0,9 stycken. Data avseende drift och underhåll under användningsfasen beskrivs i Tabell 10. Sista fasen i livscykeln, dvs sluthantering, baseras på genomsnittlig holländsk hantering enligt beskrivningen i Ecoinvent. I stort innebär det att majoriteten av metaller, och ca 1/3 av plaster återvinns. Resten antas fördelas enligt deponering (5%) och förbränning (95%).

Drift	Energi/tim	L120H Diesel	L120H EI
Diesel	11,11 l	222 000 l	-
El	40,1 kWh	-	802 000 kWh
El inkl laddning <sup>a</sup>			844 211 kWh
Underhåll	Serviceintervall	L120H Diesel	L120H EI
Kylmedel	6 000 tim	159 kg	82 kg
Motorolja	1 000 tim	385 kg	-
Axelolja	1 000 tim	1 348 g	1 348 kg
Hydraulolja	1 500 tim	1 552 kg	1 552 kg
Transmissionsolja	1 000 tim	653 kg	-

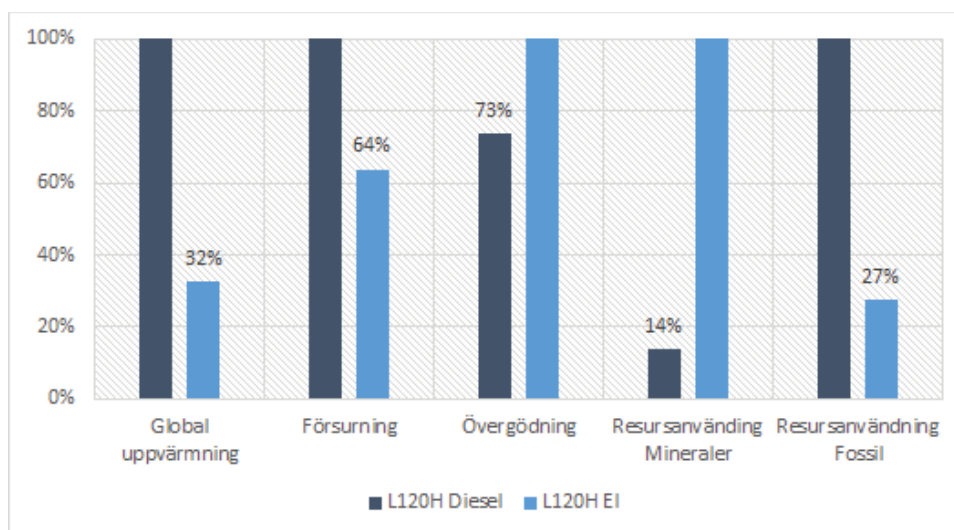
Däck	5 000 tim	4 800 kg	4 800 kg
Batterier, li-ion <sup>b</sup>	1 000 cykler	-	4 166 kg

<sup>a</sup> Baserat på antagande om att laddarens effektivitet är 95%.

<sup>b</sup> 2,71 batterier behöver bytas ut under den undersökta perioden.

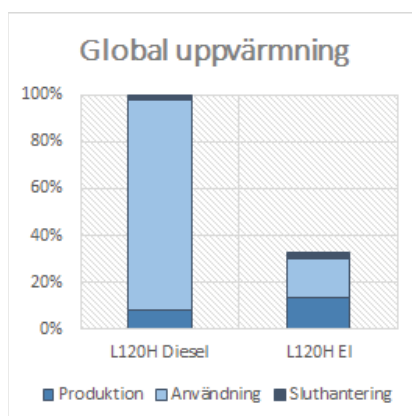
*Tabell 10: Data för drift och underhåll under en drifttid på 20 000 timmar för L120H Diesel och L120H EI.*

Resultaten redovisas i Figur 31, där den hjullastare som har den högsta miljöpåverkan i respektive kategori är den som utgör basen för den relativa jämförelsen (=100%). I figuren ses att L120H Diesel ger upphov till högre miljöpåverkan vad gäller global uppvärmning, försurning och fossil resursanvändning. Genom att använda en L120H EI kan man minska miljöbelastningen med 68%, 36% respektive 73%. Miljöpåverkan vad gäller övergödning och resursanvändning av metaller och mineraler är dock högre för en eldriven hjullastare där en dieselsonsion har 27% respektive 68% mindre påverkan.

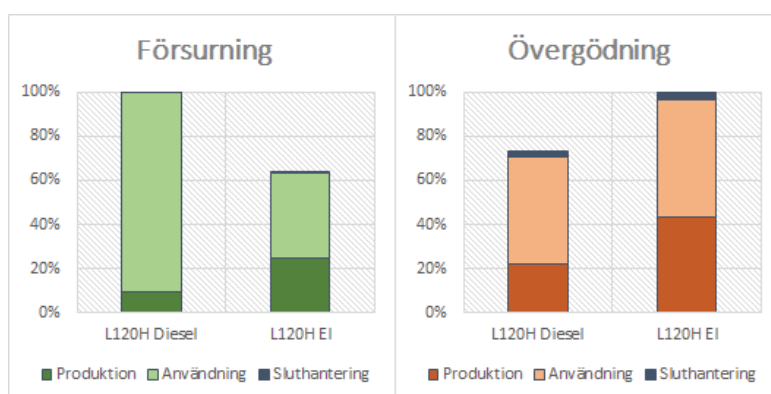


*Figur 30, Relativ miljöpåverkan i de undersökta påverkanskategorierna för en L120H Diesel och L120H EI.*

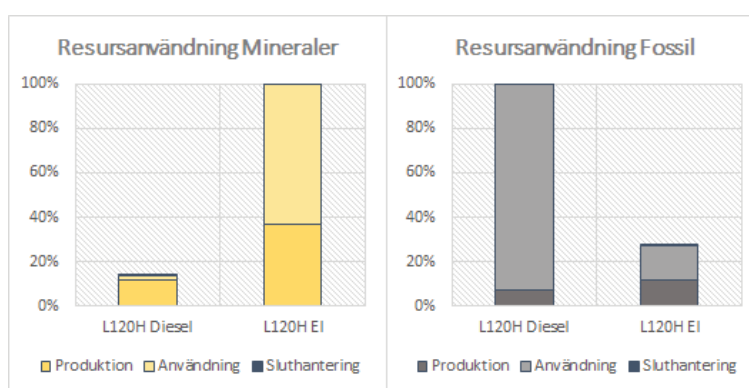
För att se vad skillnaderna beror på, presenteras miljöpåverkan för respektive kategori och för de olika livscykelstadierna produktion, användning och sluthantering, Figur 32 till Figur 34.



*Figur 31, Relativ jämförelse avseende påverkan på global uppvärmning indelat i olika livscykelstadium mellan en L120H Diesel och en L120H EI.*



Figur 33, Relativ jämförelse avseende påverkan på försurning och övergödning indelat i olika livscykel faser mellan en L120H Diesel och en L120H EI.



Figur 32, Relativ jämförelse avseende påverkan på användning av mineraler respektive fossila resurser indelat i olika livscykel faser mellan en L120H Diesel och en L120H EI.

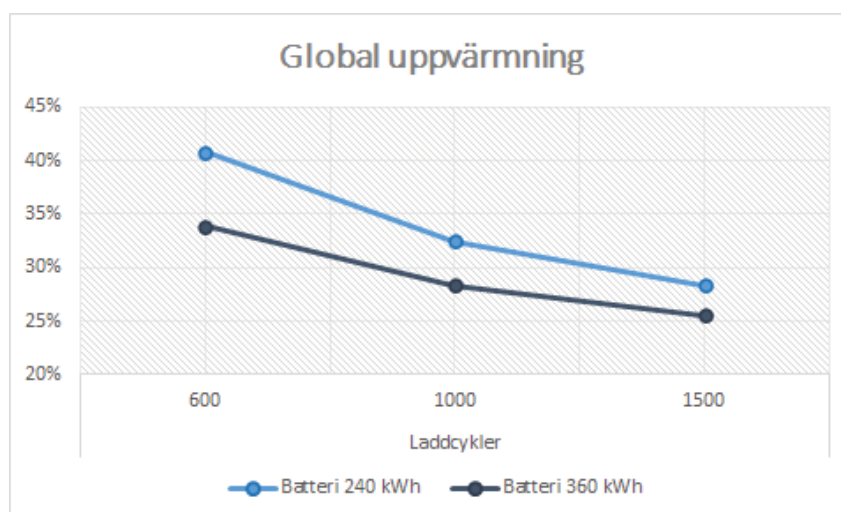
Som framgår av figurerna ovan, där betydelsen av olika livscykel faser presenteras är det framförallt användningsfasen med drift och underhåll som dominerar i merparten av kategorierna. Anledningen för L120H Diesel är dieselanvändningen medan det för L120H EI är det underhållet där byte av batterier är den viktigaste bidragande parametern. Undantaget är användning av metaller och mineraler, vilket är ett förväntat resultat för dieselversionen, då bränsleanvändning i sig inte är en stor bidragande faktor. Där är det istället den produktionsfasen som är mer betydande i och med materialet som behövs till hjullastaren och dess utvinning och processande. Behovet av metall- och mineraler vid tillverkningen av en L120H EI och vid underhåll med batteribytet där litium, kobolt, mangan, nickel och grafit har en betydande påverkan i denna kategori. Det är också anledningen till att elversionen dominerar vad gäller övergödning. När det gäller sluthantering så utgör den delen av livscykeln en mindre betydelse för båda versionerna av hjullastare och i alla de studerade påverkanskategorierna.

Även för L120H görs känslighetsanalyser med avseende på livslängd och kapacitet för batterierna samt för olika elmixer. Batteriets nuvarande kapacitet antas vara 240 kWh där ett framtidsscenario är att samma batterisystem inom några år har en kapacitet på 360 kWh. Vidare antas olika antalet laddningscykler för att beskriva batteriernas livslängd. Ett antagande är att när batteriet når 80 % SOH byts det. I denna analys jämförs tre fall för att ta undersöka vilken effektbatteriernas livslängd och kapacitet har på elfordonens miljöprestanda. Fallen är kort, normal (basfall) och lång livslängd på batterierna och kapaciteten som undersöks är 240 kWh (basfall) och 360 kWh för ett batteri i framtiden, se tabell 11.

Kapacitet	Livslängd	Antal batterier under analysperioden	
		240 kWh	360 kWh
Laddcykler	600 (kort)	6.19	4.12
	1 000 (normal)	3.71	2.48
	1 500 (lång)	2.48	1.65

Tabell 11: Olika livslängd och kapacitet på batterier och antalet som behövs under analysperioden.

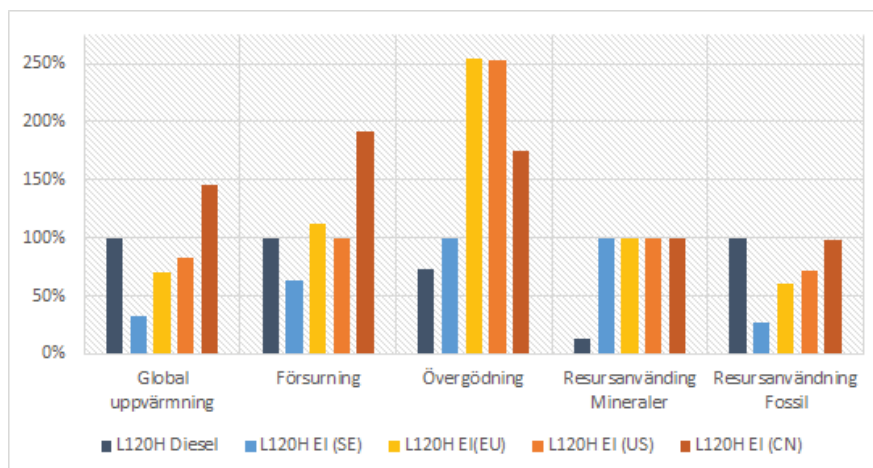
I Figur 35 redovisas påverkan på den globala uppvärmningen av olika livslängd och kapacitet på de batterier som används. Påverkan relateras till en L120H diesel, det vill säga att en L120H EI med ett batteri på 240 kWh och en livslängd på 600 laddcykler kommer att ha 40% lägre påverkan på global uppvärmning jämfört med L120H Diesel. Om batteriet istället har en livslängd på 1500 laddcykler och en kapacitet på 360 kWh så är motsvarande siffra 75% lägre miljöbelastning. Det kan utläsas av figuren att en högre kapacitet på batteriet är mer betydande ju kortare livslängden batteriet har. Detta resultat gäller generellt sett för övriga påverkanskategorier, även om de relativa nivåerna skiljer sig åt.



Figur 34, Påverkan på global uppvärmning relativt L120H Diesel av en L120H EI med olika livslängd och kapacitet på batterierna.

Vad gäller elproduktionens betydelse undersöks tre elmixer och dessa jämförs med basfallet för L120H Diesel samt L120H EI. I basfallet antas en svensk elmix och de som används för känslighetsanalysen är genomsnittliga elproduktion i EU, US och Kina. Resultatet av känslighetsanalysen presenteras i Figur 36. Den version av hjullastare i basfallet som har högst miljöbelastning, är den som ligger till grund för jämförelsen i respektive påverkanskategori. Det betyder att för global uppvärmning, förurning och fossil resursanvändning är det L120H Diesel som ligger till grund för jämförelsen (=100%). Motsatsen är fallet för övergödning och resursanvändning av mineraler, där L120H EI är =100 %. De tre alternativen som representerar olika elmixer är sedan relaterade till dem.



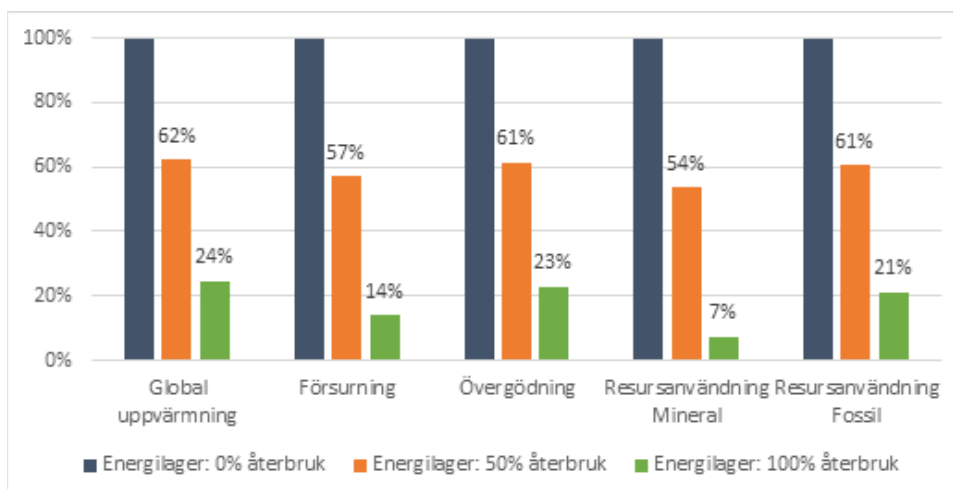


Figur 35, Effekten på miljöpåverkan för en L120H EI med antagande om olika elmixer.

Som illustreras ovan är påståendet om förbättrad miljöprestanda vid konvertering till elfordon mycket beroende av hur den el som används för att ladda batterierna är producerad. Miljöpåverkan skiljer sig åt mellan de olika alternativen, där skillnaden ibland är väsentlig. Att använda hjullastaren in en svensk miljö är generellt sett bäst av de eldrivna alternativen. Det beror på att det mesta av elen i Sverige produceras med förnybara energikällor och kärnkraft. En kinesisk elmix däremot resulterar i en betydande högre påverkan, speciellt vad gäller global uppvärmning och där en eldriven hjullastare blir likvärdigt en dieseldriven i fallet med resursanvändning av fossila bränslen. Det beror på att mer än 60% av de energiråvaror som används i elproduktionen är fossila. När det gäller resursanvändning av mineraler är det liten skillnad på att använda olika elmixer. Detta är ett förväntat resultat eftersom denna påverkanskategori främst representerar effekten av att använda mineraler och metaller.

### Energilager container

För platser där inte elnätet har tillräckligt med kapacitet att klara leverera den effekt som behövs för att ladda eldrivna arbetsmaskiner utöver det övriga effektbehovet, så finns alternativet att ha ett lokalt energilager bestående av batterier. Fördelen är att man dels kan kapa effekttoppar, dels återbruka batterier som inte längre kan användas i sin första applikation men som i en andra livscykel passar som energilager. En utvärdering görs avseende en 20ft containerenergilagring, där miljöpåverkan av själva containern beräknas samt att en studie görs avseende dess betydelse satt i sammanhang med en lösning där L120H EI används. Själva energilagret baseras på da Silva Lima m.fl. [19] och är anpassat till en 20ft containerlösning som testats i projektet.



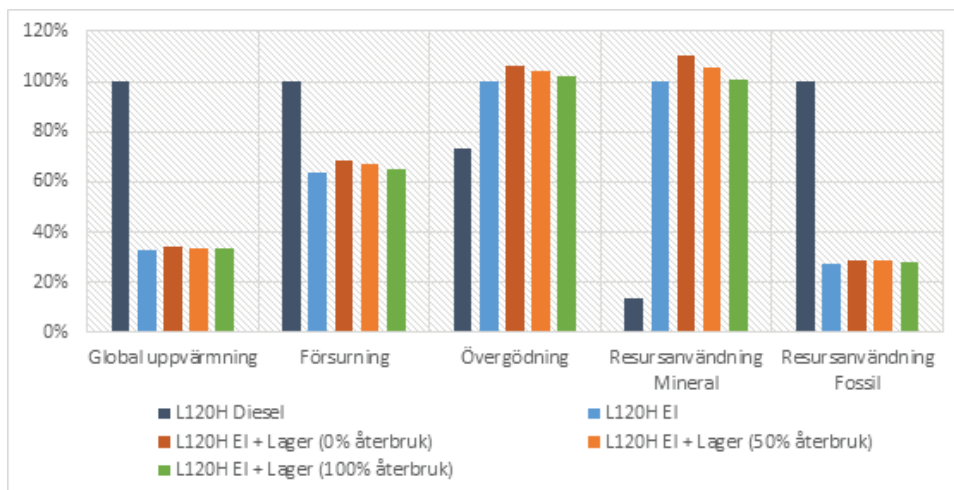
Figur 36, Effekten på miljöpåverkan för ett 20ft energilager med antagande om olika andel använda batterier.

Tre olika alternativ för energilagret undersöks där andelen återbrukade batterier som används i energilagret varierar. Alternativen är 0% återbrukade batterier (100% nya), 50% återbrukade batterier och 100% återbrukade batterier. Ett antagande är att ingen ersättning av batteripack behöver genomföras under analysperioden.

Resultaten presenteras i Figur 37 där en relativ jämförelse görs av container medmaterialbehov, utvinning och process, samt sluthantering. Energilagret med 0% återanvända batterier är det alternativ som utgör basen för jämförelsen. Figuren illustrerar den miljömässiga vinsten av att använda batterier för en andra livscykel jämfört med batterier som är i sin första livscykel. Som ses kan den vara betydande. En anledning är att all miljöpåverkan som uppstår fördelas till den första livscykel av ett material eller en produkt. Det innebär att de återbrukade batterierna som installeras i energilagret inte ger upphov till miljöpåverkan i denna applikation. I stället fördelas den miljöpåverkan till hjullastaren, i detta fall, där batteriet har sin första användningsfas. Att miljöbelastningen minskar så pass mycket med en högre andel

återanvända batterier beror på den höga belastning som nya batterier har. Exempelvis, i grundfallet med 100% nya batterier utgör dessa över 85% av belastningen för energilagret.

Ett fall undersöks där energilagret inkluderas i en lösning med en L120H EI hjullastare. Användningen av energilagret utgår från den beskrivning som ges i Kapitel 6.5. Enligt det test som genomfördes användes lagret för att kunna begränsa effektuttaget från nätet, med andra ord laddades hjullastaren till dels via nätet (80kW), dels via energilagret (90kW). Ett antagande görs att energieffektiviteten av ett energilagret är 85%, vilket omfattar laddning och urladdning av batteripacken.



Figur 37, Relativ jämförelse på miljöbelastning av olika lösningar med L120H och energilagret.

Det ger att elbehovet inklusive förluster för en L120H EI, som finns beskrivet i tabell 10, ökar till ca 902 GWh, fördelat på 356 GWh via nätet och 546 GWh via energilagret. Ett antagande görs att energilagret kan serva 10 hjullastare, varför 1/10 av miljöpåverkan tas i beaktande i utvärderingen. Figur 38 presenteras en relativ jämförelse av L120H Diesel och L120H EI utan energilagret med de alternativa sammansättningarna av nya och återbrukade batterier i ett energilagret.

En slutsats som kan dras är att inkludera ett energilagret inte kommer att ändra på det övergripande resultatet. De fall där L120H EI ger en lägre miljöpåverkan innan energilagret läggs till kommer även att ha lägre miljöpåverkan då den inkluderas och vice versa. I fallet har, som ovan nämnts, 1/10 av energilagrets miljöpåverkan inkluderats i utvärderingen. Även vid antagande om att en container servar en hjullastare så kommer det inte påverka resultatet av jämförelsen i större utsträckning, annat än vid försurning. I den påverkanskategorin blir en containerlösning med 100% nya batterier ett sämre miljömässigt alternativ än en L120H Diesel (+9%).

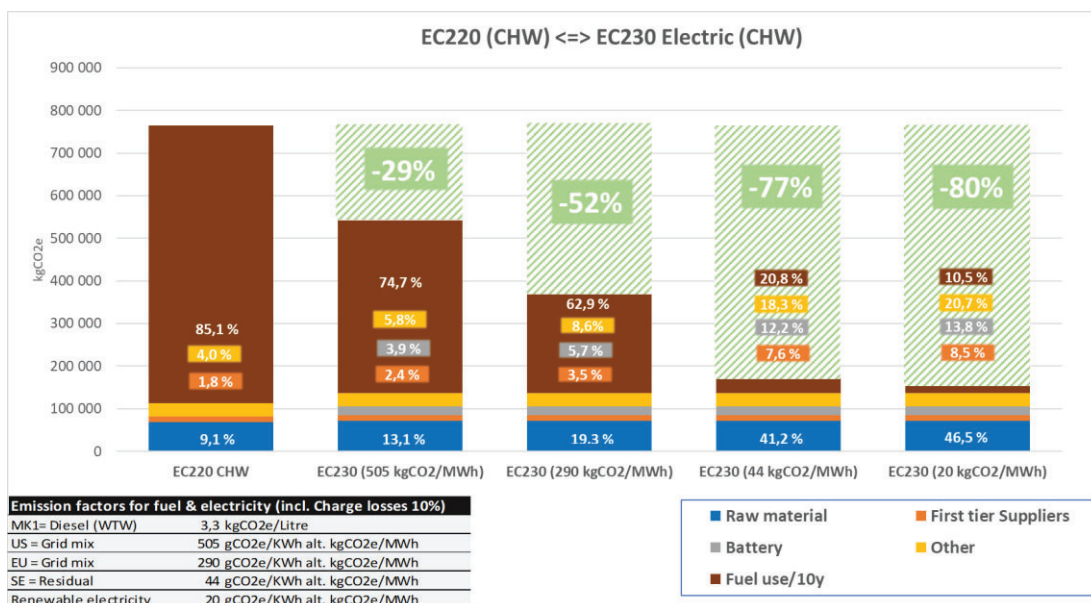
**Volvo Construction Equipment har utvecklat en metod för att kvantifiera sina produkters klimatpåverkan över produktens livscykel.**

**EC230**

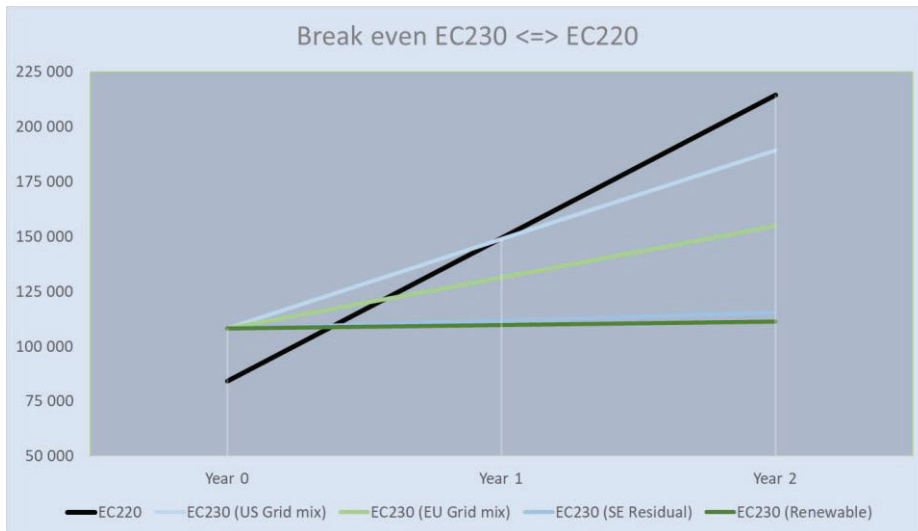
Volvo CE har utvecklat en metod för livscykelanalys, som innebär att med hjälp av data visa den totala klimatpåverkan våra maskiner ger under sin livscykel - från brytning av råvara, genom tillverkningsfasen och användandefasen fram till slutligen återvinning av maskinen [20]. Alla maskiner som har analyserats publiceras på webbsidan, där EC230 Electric [21] och EC220 [22] är två exempel.

Utifrån historiska driftsdata görs övergripande jämförelse mellan EC220 och EC230 och utifrån den metod för att beräkna klimatavtrycket som Volvo använder. Livscykeln antas till 10 år, till vilken en genomsnittlig drifttid och bränsleförbrukningen läggs till för EC220, vilken jämförs med EC230 vars energianvändning estimerats utifrån tester som genomförts. Till det läggs 10% i energiförluster till. Resultatet av jämförelsen redovisas i Figur 39, där även effekten av olika elmixer inkluderas. I figuren ses hur mycket koldioxid som undviks om en EC230 Electric används under en beräknad livslängd av 10 år istället för en EC220. Generellt sett leder EC230 Electric till något högre klimatavtryck än EC220 vad gäller materielbehovet i själva arbetsmaskinen. Skillnaden i klimatavtryck från tillverkningen återvinns dock i energianvändningen där klimatavtrycket för den dieseldrivna E220 dominerar stort. Beroende på vilken elmix som används i den eldrivna arbetsmaskinen så kommer klimatavtryck att vara mellan 29% (US) till 80% (SE) lägre än diesel.

I Figur 40 redovisas brytpunkten vid vilken EC230, som har ett högre initialt CO<sub>2e</sub> fotavtryck från tillverkningsfasen relativt den dieseldrivna EC220, kommer ha lägre miljöpåverkan total sett. Vid den punkten kommer det vara bättre ur ett klimatperspektiv att använda en EC230 Electric istället för EC220. Om EC230 laddas med svensk elmix eller med förnybar mix (sol, vind, vatten) tar det knappt 6 månader innan brytpunkten uppnås. Om den europeiska elmixen används nås motsvarande tid efter drygt 6 månader och om elmixen i USA används vid laddning infinner sig brytpunkten efter 12 månader.



Figur 38, Relativ jämförelse på klimatavtryck mellan en EC220 och en E230 Electric med olika elmixer.



Figur 39, Break even EC230 och eC220 Electric.

### Under projektet har Volvo CE parallellt gjort en analys av L120 Conversion

L120 har sedan tidigare analyserats i VCEs LCA Program. I projektet har en jämförelseanalys genomförts mellan en L120 och en L120 Electric conversion. Vi har utgått från en L120 räknat in hela händelseförloppet från en L120 till en L120 Electric conversion. Maskinen byggs om på CE Engineering Solutions (CEES) i Malmö, en leverantör (Parker) står för konverteringskitet som består av hela den nya drivlinan med elmotor och batteri osv.

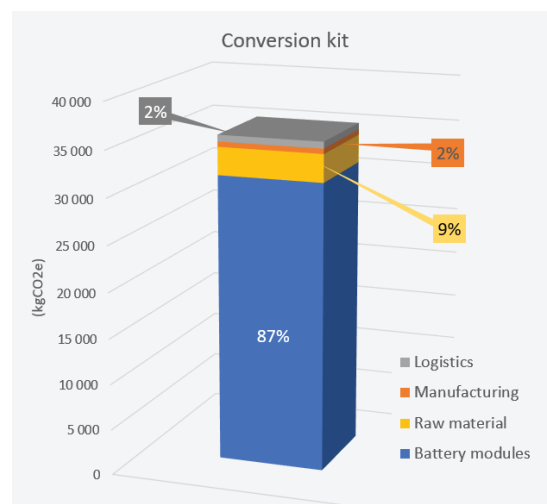
Parker			Volvo CE				
liier	Inbound log.	Raw material	L120 Cradle to Gate LCA/CFP	Logistics ARV -> Malmö	Rebuild CEEC	Credit, Raw material	Return logistics
31 778	132	1 789	92 960	557	1 346	-2 950	29

Sum	125 641	(kgCO2e)
-----	---------	----------

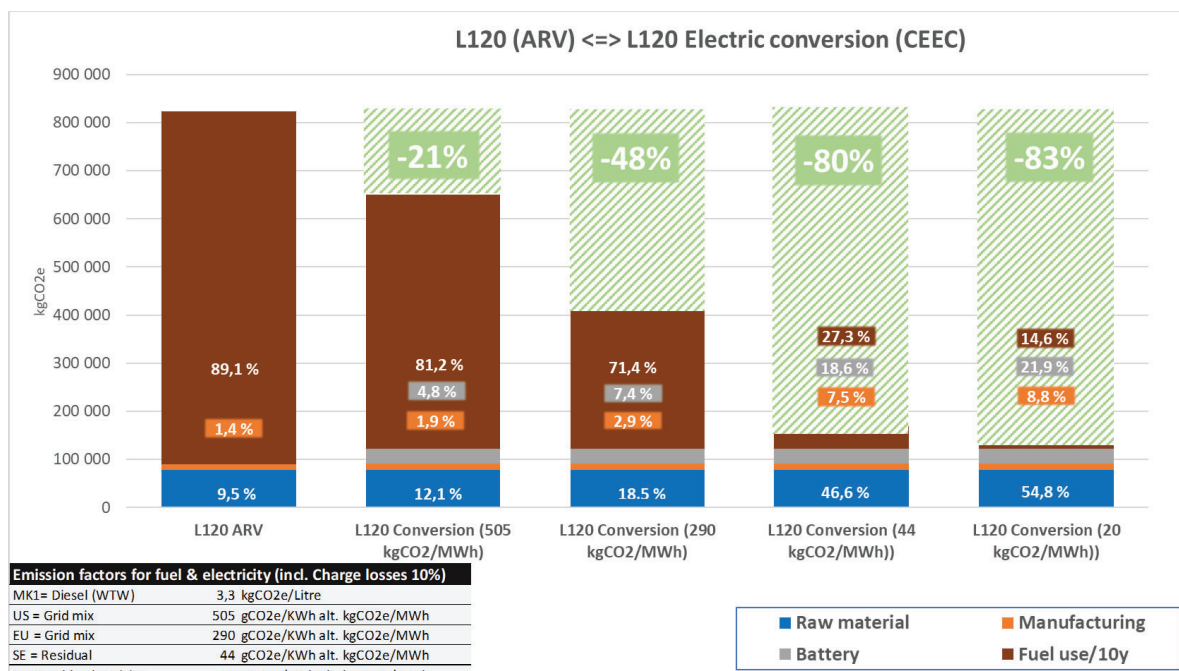
Tabell 12: Emissioner som uppstår i olika steg kopplat till konverteringen

I tabell 12, redovisas emissioner som uppstår i olika steg kopplat till konverteringen. Det totala koldioxidavtrycket ökar med 35% om alla steg räknas in och en kreditering av returmaterial görs på samma analysnivå som i Volvo CE LCA metod [23]. Det ökade koldioxidavtrycket fördelas enligt Figur 41

Även för L120 och L120 Electric conversion beräknar vi livscykeln till 10 år, den genomsnittliga drifttiden är också känd för L120 (2097 h/år), vi lägger också till 10% i energiförluster i samband med laddning.



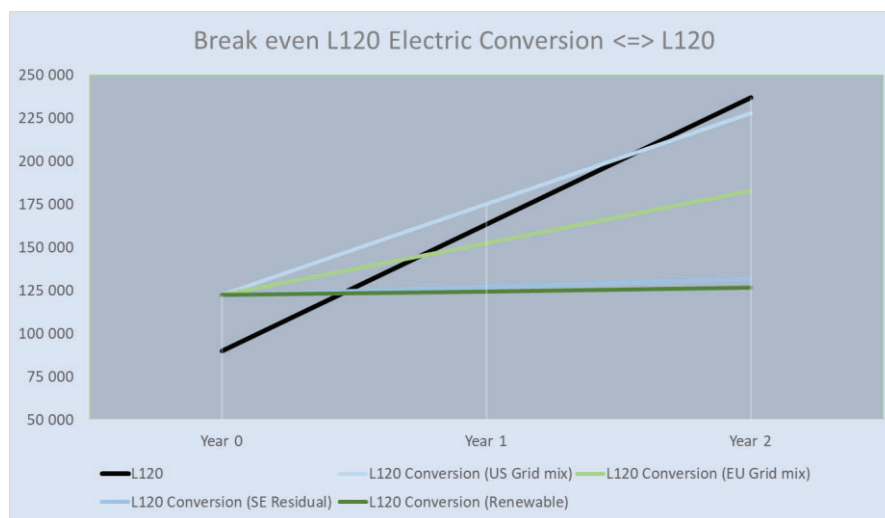
Figur 40, Fördelning koldioxidavtryck



Figur 41, Jämförelse L120 Diesel & L120 Electric Conversion

Jämförelsen är bara maskin mot maskin d.v.s. laddningsinfrastruktur och övrig kringutrustning förutsätts finnas på plats. En intressant aspekt är att ju grönare elektricitet vi använder desto viktigare blir det att fokusera på andra livscykelsteg än användarfasen, se Figur 42.

I Figur 43 redovisas brytpunkten när L120 Electric conversion har totalt sett ett lägre klimatavtryck relativt den dieseldrivna L120. Om L120 Conversion laddas med svensk elmix eller förnybar mix (sol, vind, vatten) tar det knappt 6 månader innan break even uppstår och det är bättre ur ett klimatperspektiv att använda en L120 Electric conversion istället för en dieseldriven arbetsmaskin L120. Om den europeiska elmixen används är motsvarande tid efter drygt 8 månader och om elmixen i USA används vid laddning infinner sig brytpunkten efter ca 18 månader.



Figur 42, Redovisning av break even

## 6.11 AP11 Systemdemonstrationer i tre olika applikationer

### Genomförd demonstration av emissionsfri systemlösning, på site, med bibehållen produktivitet i tre applikationer.

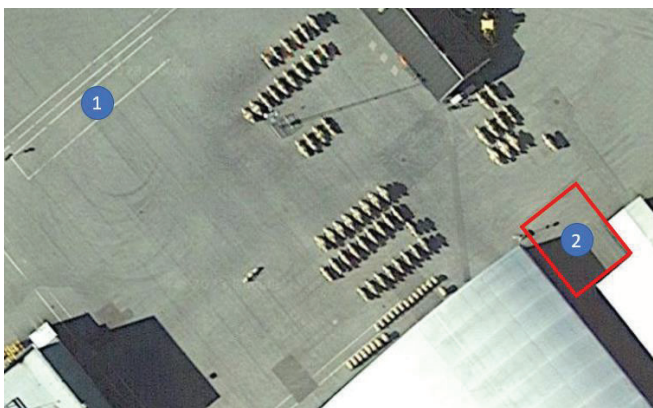
Projektets systemdemonstrationer har genomförts i tre huvudapplikationer;

- **Produktion** på Volvo CEs komponentfabrik i Eskilstuna
  1. Medelstor elektrisk hjullastare i pallhantering i systemlösning med manuell, automatisk konduktiv laddning och automatisk induktiv laddning
- **Processindustri** i Heidelberg Cements bränslehall i Slite
  2. Medelstor elektrisk hjullastare i hantering av återvunnet material i systemlösning med manuell, automatisk konduktiv laddning och automatisk induktiv laddning samt stationärt energilager.
- **Återvinning** i flertalet delprocessteg på Stena Recyclings anläggningar i Halmstad
  3. Medelstor elektrisk hjullastare i hantering av återvunnet material i systemlösning med manuell och automatisk konduktiv laddning
  4. Medelstor bandgrävare i hantering av återvunnet material i systemlösning med manuell laddning med och utan fjärrstyrd lastmottagare
  5. Medelstor nätansluten hjulgrävare/materialhanterare i hantering av återvunnet material med och utan modulärt kabelrullesystem i systemlösning med och utan mobilt energilager.

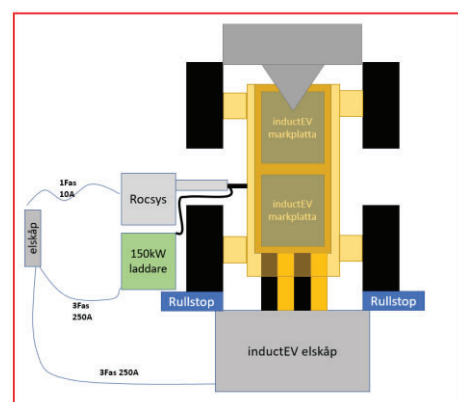
#### 1. Medelstor elektrisk hjullastare i pallhantering i systemlösning med manuell, automatisk konduktiv laddning och automatisk induktiv laddning

Den medelstora batterielektriska hjullastare som utvecklats under projektet testades på alla tre siter i projektet. Projektet valde att lägga den första systemdemonstrationen på Volvo CE's komponentfabrik på grund av närhet till utvecklingskontoret som har utvecklat maskinen som är den första förseriemaskinen i sitt slag. Utöver detta valde projektet att följa föreslagen väg från site och systemanalysen (AP2) att sätta upp både manuell laddning samt konduktiv respektive induktiv automatisk laddning för att bygga erfarenhet kring systemen trots att de ur ett energibehovsperspektiv inte ansågs behövas för applikationen.

I Figur 45 markerat med siffrorna två, framgår vart på siten laddningsplatsen sattes upp. Platsen valdes dels av hänseende till flöden på site där utrustningen inte är i vägen och hindrar annan aktivitet, dels i förhållande till vart på site strömförsörjning finns tillgänglig och även i förhållande till vart maskinen primärt skall arbeta. I Figur 45, markerat med siffrorna ett, framgår zonen där lastbilar parkerar för att lastas eller lossas vilket till stor del styr maskinen i frågas arbete.



Figur 43, Eskilstuna SE75, testsiten



Figur 44, Laddsetup

Lokaliseringen av laddningsplatsen möjliggör uppsikt över denna zon vilket förenklar testförfarande där maskinen laddas vid varje möjligt tillfälle. Viktigt är dessutom närheten till fikarummet, vilket ses

rakt framför laddplatsen i Figur 455, detta gör det enkelt för maskinisterna att ställa maskin på laddning vid varje rast.

En viktig utkomst från systemdemonstrationen i Eskilstuna var laddningsplatsens utformning. På förhand togs en uppställning fram schematiskt, Figur 44, som möjliggör linjering till båda de automatiska laddningssystemen. De båda laddningssystemen har ganska höga krav på linjeringen:

- För det konduktiva systemet behöver maskinens ladduttag hamna inom en liksidig kvadrat på ca 25cm i längdled, sidled och höjddled med en offset vinkel på enstaka grader för att roboten skall kunna lokalisera uttaget och sätta i laddhandsken.
- För det induktiva systemet behöver laddplattorna som monterats under maskinen, se Figur 46, hamna inom +/- 10 cm i sidled och längdled mot markplattorna samtidigt som plattorna förbli parallella (0,5 grader offset vinkel är inom tolerans). Avståndet mellan plattorna avgör sedan om maxeffekt uppnås – i detta fall 14 cm, något som kan anpassas från leverantören av laddningssystemet. Hamnar plattorna för nära varandra reduceras laddeffekten snabbt, hamnar plattorna för långt ifrån varandra kan inte laddning initieras alls. Väl på plats på site lades initialt arbete på att utvärdera tillsammans med operatörerna vilka linjeringshjälpmedel som var nödvändiga. Med tanke på ovan krav antogs både fysiska hjälpmedel (rullstopp) och visuella hjälpmedel vara nödvändiga men det visade sig snabbt att operatörerna har så pass bra kontroll på maskin att enbart visuella hjälpmedel var nödvändiga för att repeterbart kunna linjera maskin inom tolerans för laddningsutrustningarna. Vissa operatörer föredrog att linjera maskin med hjälp av backkameran mot utsatta referenspunkter på marken, se Figur 48, medan andra linjerade hjulen mot hjälplinjer i backen genom att titta i backspegel och ut genom fönstret, se Figur 47. Leverantörerna av båda laddningsutrustningarna var förvånade över hur få hjälpmedel som behövdes för att säkerställa repeterbar linjering, bidragande faktorer till detta anses vara:

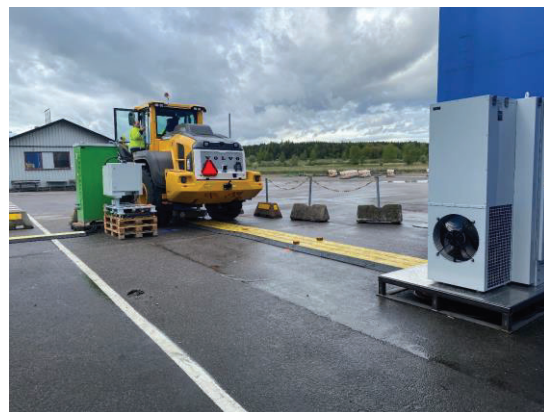


Figur 45, Installation av laddplattor för induktionsladdning

- Professionella operatörer av arbetsfordon har en helt annan vana och ett helt annat behov av att ha kontroll över maskinen än till exempel chaufförer inom taxibranschen där en av leverantörerna i tidigare test upplevt ett större behov av hjälpmedel för linjering.
- Hjullastarens midjestyning som gör att en mindre fellinjering enkelt kan rättas upp stillastående utan att ett helt omtag behöver genomföras.



Figur 47, Linjering mot referenspunkter



Figur 46, Visuellt linjering

Citatet **”det är en hjullastare, bara med batterier istället för dieselmotor”** från en av operatörerna sammanfattar veckorna ganska bra. Maskinen hade inga problem att ersätta den ordinarie dieseldrivna hjullastaren vad det gäller arbetet, Figur 49. Det fastställdes relativt snabbt att energiåtgången för applikationen var något högre än förväntat då maskinen arbetar intensivt de perioder den är i rörelse. En systemlösning med en 150kW manuell snabbbladdare och laddning över natt, maskin arbetar 2,5 skift, och på raster hade dock täckt behovet. Automatisk laddning i denna applikation är inte så enkelt att befoga då operatören vid skiftslut och raster ändå går ur maskinen och då kan stoppa i laddhandsken och starta laddning. Projektet valde dock att under större delen av testet ändå låta operatörerna utvärdera de två automatiska laddningssystemen för att få mer input och mer förberedelse inför övriga systemdemonstrationer med samma uppsättning.



Figur 48, Pallhantering på Volvo CE operations

Den induktiva laddningen är en dyrare utrustning som kräver längre tid att installera och tar upp mer plats på site än den konduktiva laddroboten. Åsikten och den samlade bilden från testoperatörerna är att båda systemen fungerar men tjänar olika syften:

- Om applikationen kräver laddning vid varje möjligt tillfälle är den induktiva laddningen att föredra då den fortare initieras, fortare avslutas, är mindre toleranskänslig och upplevs mer robust då inga rörliga delar finns i systemet. Om en maskin laddas vid varje möjligt tillfälle innebär detta fort många laddcykler varpå en dyrare lösning kan befogas om det kan garantera mindre risk för stillestånd.
- Laddroboten ses som en mindre avancerad lösning som kan vara ett alternativ i applikationer med lägre krav på snabbhet och robusthet eller där en induktiv lösning inte är tillämpbar på grund av budgetbegränsningar eller förekomst av ferritmaterial.
- Att ladda manuellt anses i den testade applikationen vara gott nog då energiåtgången inte kräver laddning oftare än vad operatören ändå ska ta sig i och ur maskinen. Ur arbetsmiljöperspektiv för en applikation där laddning vid varje möjligt tillfälle krävs anses automatiska laddningssystem nödvändigt för att inte riskera förslitningsskador och olyckor.

## **2. Medelstor elektrisk hjullastare i hantering av bränsle, i form av återvunnet material, i systemlösning med manuell, automatisk konduktiv laddning och automatisk induktiv laddning samt stationärt energilager.**

Veckan efter testen avslutades på Volvo CE's komponentfabrik i Eskilstuna startades systemdemonstrationen på Heidelberg Materials anläggning i Slite på Gotland. Samma dag som systemet med laddningssystem och maskin anlände kunde första provladdning göras på båda de automatiska laddningssystemen. Detta som en följd av erfarenheterna som byggts under veckorna i Eskilstuna vad det gäller både installationsförfarande men även linjeringsbehov. Projektet valde att inte ge för mycket information till operatörerna från OSAB kring hur man valt att sätta upp olika linjeringshjälpmedel i Eskilstuna för att få deras opåverkade idéer. I slutändan blev uppställningen i



Slite i princip identisk med den i Eskilstuna med visuella markeringar i marken och ett järnrör som referens för hur långt maskin skall backas bakåt, se Figur 50 och Figur 51. Precis som i Eskilstuna hade operatörerna från OSAB inga som helst problem att repeterbart linjera upp maskin för laddning inom tolerans.



*Figur 50, Uppställning av laddsystem 1*



*Figur 49, Uppställning av laddsystem 2*

Till skillnad mot Eskilstuna pågår applikationen i Slite dygnet runt och alla dagar i veckan. Vilket ställer högre krav på laddningssystem att dels återupprepat fungera vid varje laddningstillfälle men även att tillräcklig effekt uppnås när laddning initieras. Allt för att hålla upp batteriernas laddningsnivå, State of Charge, kontinuerligt. Vid skiftbyte och raster finns viss ställtid då maskin har möjlighet att laddas och under aktivt arbete uppskattas ca 10-15 min varje timme finnas tillgängligt för laddning.

Precis som i Eskilstuna lades en testplan upp där båda de automatiska laddlösningarna testas för att kunna dra slutsatser kring deras för- och nackdelar. Systemdemonstrationen började använda det induktiva systemet och klarade första dygnet att upprätthålla produktion med positiv input kring både maskinen och laddningssystemen. Under andra dygnet började maskinen ta emot mindre laddeffekt varpå felsökning inleddes. Relativt snabbt identifierades rotorsaken till värmeuppbyggnad i maskinens batterisystem vilket som följd begränsar laddeffekten in i maskinen. I denna applikation körs maskinen antingen ganska hårt för att mata processen med bränsle alternativt står maskinen på laddning. Vid laddning är medeffekten för batteriet ungefär dubbelt så högt som när maskinen arbetar vilket innebär att batteriet aldrig får vila. Denna problematik upptäcktes inte under testerna i Eskilstuna då maskinen fick vila under natten när laddningen var färdig. Projektet återkopplade det upplevda beteendet till maskinutveckling inom Volvo CE och åtgärder har genomförts för att förbättra kylningen av batterierna.

På grund av ovan valde projektet att gå ner och köra maskinen på 2,5 skift som man gjort i Eskilstuna varpå problematiken undviks. På detta vis kunde projektet fortsatt göra en utvärdering av både maskin och laddningssystem på ett tillförlitligt vis. Inget av de automatiska laddningssystemen begränsade maskinens produktivitet under testet.

Den sammantagna bilden av systemdemonstrationen i Slite är att:

Maskinen som användes under testet är en förseriemaskin, se Figur 52, därav finns förståelse för att vissa system behöver mognas, så som den aktiva kylningen av batterierna. Samtidigt är det tydligt att maskinen presterar fullgott för hård körning i 2,5 skift så länge det finns en återhämningsperiod för maskinen. Under de två veckor tester pågått har tillräckligt med timmar körts för att bedöma att maskinen klarar av att ersätta en konventionell dieselmaskin i applikationen. Givet att värmeuppbyggnadsproblematiken i batterierna åtgärdas går det att upprätthålla tillräckligt hög laddningsnivå i maskinen med hjälp av att ladda vid varje möjligt tillfälle.

Att ladda vid varje möjligt tillfälle ses inte som ett problem. Det handlar snarare om ett annat synsätt och att se laddningen av maskinen som lika stor del av arbetet som fyllning av bränsle i processen. Detta gäller på flera olika nivåer från operatör till sitemanager. Nogsammare planering för att effektivisera energiåtgång och skapa fler laddningstillfällen behöver ses som en möjlighet snarare än ett hinder i övergången till emissionsfria arbetsmaskiner.

Vad det gäller de två automatiska laddningssystemen dras samma slutsatser som i Eskilstuna med fördel för den induktiva laddningslösningen. Applikationen i Slite kräver en automatisk laddningsutrustning för att upprätthålla en bra arbetsmiljö och den tillåter heller inte misslyckade laddningstillfällen då alla tillfällen som ges måste tas för att upprätthålla dels laddningsnivån i batteriet i maskin men i slutändan produktiviteten som krävs för att klara applikationen.



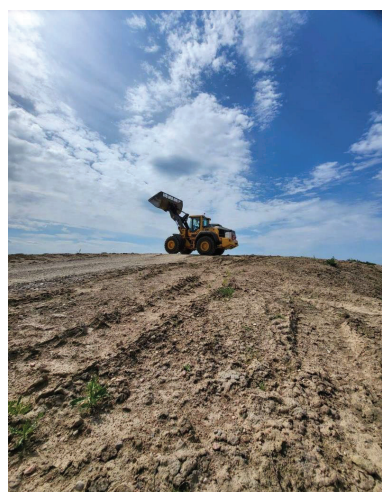
*Figur 51, Förseriemaskin*

### **3. Medelstor elektrisk hjullastare i hantering av återvunnet material i systemlösning med manuell och automatisk induktiv laddning**

Sista systemdemonstrationen för den elektrifierade hjullastaren inom projektet genomfördes på Stena Recyclings anläggning i Halmstad, se Figur 54. Enligt plan i detta fall utan den automatiska induktiva laddningen. Systemdemonstration genomfördes på både deponin och fragmenteringen, i båda fallen arbetade maskinen med att lasta ut utsorterat material från fickor under matarband till ficka för upplag, nästa steg i processen eller för transport på utgående lastbil.



*Figur 52, Laddplats*



*Figur 53, Stena recycling i Halmstad*

Vid denna systemdemonstration utnyttjades den elektriska infrastrukturen som redan förberetts inför testet av den medelstora bandgrävmaskinen. Detta innebär att laddplatsen hamnade relativt långt bort från maskinens arbetsområde, se Figur 53. Detta bedömdes på förhand inte vara något större problem, utan snarare ett bra testfälle för att undersöka hur laddplatsens position i förhållande till maskinernas naturliga parkeringsplatser påverkar, då energiåtgången bedömdes enbart kräva

laddning under raster och över nätter. Denna bedömning visade sig stämma så till vida att maskinen med detta laddningsschema klarade av att utföra det tilltänkta arbetet.

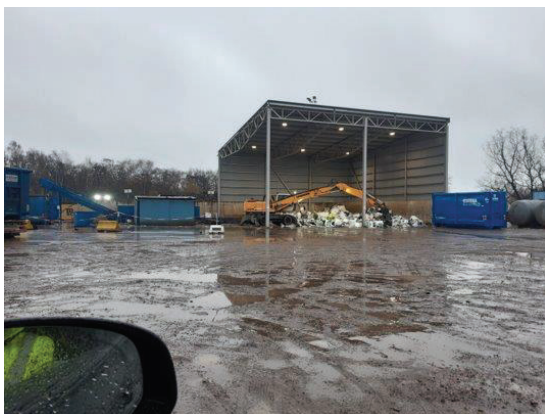
Den sammantagna bilden av systemdemonstrationen i Halmstad är att:

Lokaliseringen av laddplatsen hade påverkan på testet och maskinoperatörernas input och upplevelse. Det finns inga tvivel om att maskinen och den valda laddlösningen kan ersätta dieselmaskinerna som användes i de utvalda testapplikationerna. Däremot belyser detta vikten av att noggrant planera sina laddningsplatser vid införande av elektrifierade maskiner. Energiätgångsmässigt kan applikationen jämföras med systemdemonstrationen som genomfördes i Eskilstuna, skillnaden i det fallet var att laddplatsen var lokaliserad där maskinoperatörerna normalt parkerar maskinen vid raster och lunch. Detta för med sig att laddningen inte upplevs som en "extra uppgift" utan något som sker när man parkerar. I systemdemonstrationen i Halmstad fanns tillfällen där laddning inte genomfördes under rast vilket i slutändan resulterar i att maskin vid senare tillfälle måste ladda när den egentligen behövs för arbete, detta som en direkt följd av att laddplatsens geografiska position. Projektet ser detta som ett bra och förväntat resultat som belyser vikten av att planera infrastrukturen på ett bra vis.

Beträffande den automatiska konduktiva laddningen så var den precis som väntat överflödigt för denna applikation. Då föraren lämnar maskinen vid laddningstillfällena så anses inte bördan att manuellt stoppa i och starta laddningen stor. Lokaliseringen av laddplatsen spelade även in i denna utvärdering, då momentet att gå tillbaka till raststugan kräver mycket mer insats av maskinoperatören än att manuellt starta laddning av maskinen. Rent tekniskt fungerade laddroboten väl på samma sätt som tidigare systemdemonstrationer utan misslyckade laddningar och med enkla visuella guidehjälpmedel för linjering.

#### 4. Medelstor bandgrävare i hantering av återvunnet material i systemlösning med manuell laddning med och utan fjärrstyrd lastmottagare

Som nämndes i site och systemanalysen (AP2) genomfördes testet trots att projektet är medvetet om att en bandgrävmaskin inte är den föredragna maskintypen inom materialhantering. Dock bedömdes lärdomar som kan dras från en batteri-elektrisk materialhanterare, till att jämföras med en nätansluten vara hög nog att förbise att modifieringen av bandgrävmaskin till materialhanterare inte är optimal. Mängden applikationer hos Stena Recycling gjorde det möjligt för Volvo CE och Stena Recycling att ändå hitta en lämplig applikation. I fragmenteringen, se Figur 56, arbetar en materialhanterare i stort sett statiskt med att sortera vitvaror som läggs i container eller på transportband. Det begränsade behovet av förflyttningar gör att band i stället för hjul inte blir avgörande och markförhållandena tillät också förflyttning via band.



Figur 55, Fragmentering

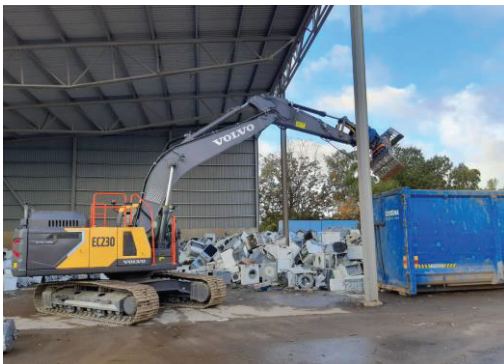
Loggning Volvo Materialhanterare (ELECTRIC)										
Datum	Tid	Konduktivitet	Tid	Konduktivitet	Tid	Konduktivitet	Tid	Konduktivitet	Tid	
14 okt	1:15	89	1:38	76	1:59	64	2:06	71	2:11	55
15 okt	1:15	100	1:38	76	1:59	64	2:06	71	2:11	55
16 okt	1:15	100	1:38	76	1:59	64	2:06	71	2:11	55
17 okt	1:15	100	1:38	76	1:59	64	2:06	71	2:11	55
18 okt	1:15	100	1:38	76	1:59	64	2:06	71	2:11	55
19 okt	1:15	100	1:38	76	1:59	64	2:06	71	2:11	55
20 okt	1:15	100	1:38	76	1:59	64	2:06	71	2:11	55
21 okt	1:15	100	1:38	76	1:59	64	2:06	71	2:11	55
22 okt	1:15	100	1:38	76	1:59	64	2:06	71	2:11	55
23 okt	1:15	100	1:38	76	1:59	64	2:06	71	2:11	55
24 okt	1:15	100	1:38	76	1:59	64	2:06	71	2:11	55
25 okt	1:15	100	1:38	76	1:59	64	2:06	71	2:11	55
26 okt	1:15	100	1:38	76	1:59	64	2:06	71	2:11	55
27 okt	1:15	100	1:38	76	1:59	64	2:06	71	2:11	55
28 okt	1:15	100	1:38	76	1:59	64	2:06	71	2:11	55
29 okt	1:15	100	1:38	76	1:59	64	2:06	71	2:11	55
30 okt	1:15	100	1:38	76	1:59	64	2:06	71	2:11	55
31 okt	1:15	100	1:38	76	1:59	64	2:06	71	2:11	55
01 nov	1:15	100	1:38	76	1:59	64	2:06	71	2:11	55
02 nov	1:15	100	1:38	76	1:59	64	2:06	71	2:11	55
03 nov	1:15	100	1:38	76	1:59	64	2:06	71	2:11	55
04 nov	1:15	100	1:38	76	1:59	64	2:06	71	2:11	55
05 nov	1:15	100	1:38	76	1:59	64	2:06	71	2:11	55
06 nov	1:15	100	1:38	76	1:59	64	2:06	71	2:11	55
07 nov	1:15	100	1:38	76	1:59	64	2:06	71	2:11	55
08 nov	1:15	100	1:38	76	1:59	64	2:06	71	2:11	55
09 nov	1:15	100	1:38	76	1:59	64	2:06	71	2:11	55
10 nov	1:15	100	1:38	76	1:59	64	2:06	71	2:11	55
11 nov	1:15	100	1:38	76	1:59	64	2:06	71	2:11	55
12 nov	1:15	100	1:38	76	1:59	64	2:06	71	2:11	55
13 nov	1:15	100	1:38	76	1:59	64	2:06	71	2:11	55

Figur 54, Loggning av energiätgång

Testets första vecka inleddes med att enbart testa den elektrifierade grävmaskinen utrustad med en sorteringsgrip tillsammans med en 150kW snabbbladdare. Den elektrifierade maskinen klarade på ett fullgott vis av att ersätta den dieseldrivna maskinen. Maskinen arbetade 1-skift och laddning skedde under frukost och lunch samt laddades fullt på kvällen/natten inför nästa arbetspass. Med detta förfarande klarade maskinen av att upprätthålla produktion.

De registrerade SOC-nivåerna vid respektive laddningstillfälle antydde att maskinen bör klara av ett helt skift och enbart laddas på kvällen/natten, se Figur 55. Testets andra vecka gjordes ingen förändring vad det gäller maskinens applikation men denna gång enbart laddning på kvällen/natten. Även med detta förfarande klarade maskinen av att upprätthålla produktion.

Volvo CE och Stena Recycling gjorde tillsammans en utförlig riskanalys inför testets utförande. En konsekvens av detta innebar att laddaren placerades en bit bort från arbetsplatsen. Detta då brandrisk från materialet som hanteras i applikationen är en risk. Vid en sådan händelse skall inte maskinen vara belägen i närheten av materialet vid laddning. I detta läge testades en maskin med band, se Figur 57, vilket så klart inte är önskvärt när transport behöver ske till laddare, detta är dock inget projektet drar några slutsatser om då ett ingångsvärde i testet var att maskintypen egentligen inte är rätt för applikationen. Det är dock en bra lärdom i transformering mot elektriska maskiner på sitenivå att laddningsplatser behöver planeras utifrån vilka maskiner som har ett behov och vart dom är stationerade men även i förhållande till material som hanteras i närheten.



Figur 56, Bandgrävare



Figur 57, Maskinsystem med fjärrstyrd lastbärare

Tredje och sista veckan testades ett maskinsystem i samma applikation där operatören i grävmaskinen går från att vara just grävmaskinsoperatör till att bli en systemoperatör som styr dels grävmaskin och dels en fjärrstyrd lastbärare, se Figur 58. Maskinen förberedes inför detta test med speciell mjukvara och kommunikationsutrustning som möjliggör att operatören med en knapp väljer om spakarna i grävmaskinen skall styra grävmaskinen eller lastbäraren.

Detta test är intressant utifrån flera anledningar vilket listas tillsammans med insikter från testet nedan;

- **Mental arbetsbelastning**
  - Operatörens upplevelse av att styra två maskiner i stället för en var en av de mest intressanta aspekterna inför detta test. På förhand fanns en oro att det skulle bli förvirrande och komplext att hålla reda på vilken maskin som styrs och vilken styrriktning som är vad beroende på färdriktning. Men operatörens upplevelse under testet var väldigt positiv där slutsatsen mer eller mindre var "antingen styr jag denna eller den andra". Med en kort inlärningskurva började operatören fylla gripen, fylla lastbäraren, byta maskin och köra i väg den fyllda lastbäraren för att dumpa. I testet dumpades materialet på en fiktiv dumpplats i närheten för att kunna säkerställa säkerheten på site.
- **Energieffektivitet och produktivitet**
  - I många fall utreds förarlösa maskiner i fullt autonoma applikationer där målet är att få bort människor ifrån riskmiljöer eller effektivisera processer. I transformeringen mot elektriska maskiner finns ett tillfälle att utreda hur förarlösa maskiner kan komplettera konventionella bemannade maskiner för att skapa effektivare maskinsystem och hålla ner

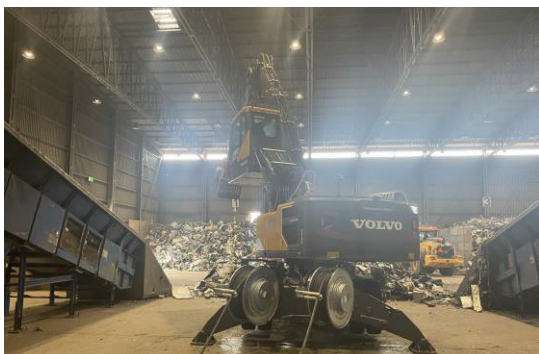
energiåtgången då energitätheten diesel erbjuder inte längre är ett alternativ. Stena Recycling ser potential i maskinsystemet då deras process idag vid vissa tillfällen innebär att samma material förflyttas flera gånger via mellandumpningsplatser innan det når sitt slutprocessteg med hjälp av till exempel en hjullastare. Att i stället lasta material till sitt slutprocessteg i en fjärrstyrd eller autonom lastbärare möjliggör effektivisering av processen i form av energi och produktivitet men skapar även möjlighet att separera operatörer från riskmiljöer. Vid jämförelse mellan att en lastmaskin ska transportera samma mängd material som den fjärrstyrda lastbäraren som testades i projektet så behöver man flytta 27-28ton lastmaskin fram och tillbaka jämfört med den ringa vikten av runt 3 ton på lastbäraren, detta indikerar en energieffektivisering på runt en faktor fyra, enbart i förflyttningen, till detta kommer att man dessutom måste lyfta upp materialet med lastmaskinen.

##### **5. Medelstor nätansluten hjulgrävare/materialhanterare i hantering av återvunnet material med och utan modulärt kabelrullesystem i systemlösning med och utan mobilt energilagrar.**

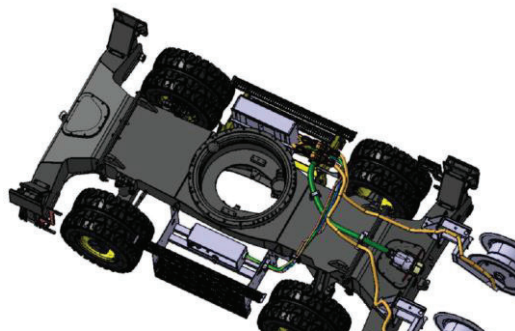
Sista systemdemonstrationen i projektet kretsade kring en nätansluten medelstor materialhanterare. Förenklat kan en materialhanterare beskrivas som en specialanpassad hjulgrävare med stödben istället för schaktbladet, grip samt höj- och sänkbar hytt. Materialhanterare jobbar ofta i begränsat område vilken gör maskintypen lämplig och intressant att utvärdera som nätansluten. Nätanslutna materialhanterare är i sig inget nytt för Stena Recycling, i sin anläggning i Halmstad har man flertalet nätanslutna materialhanterare från andra tillverkare i olika applikationer. Efter dialog kring vilka svagheter och förbättringsområden Stena Recycling och Volvo CE ser kring dessa nätanslutna maskiner, primärt runt att öka flexibiliteten, beslutades följande inför systemdemonstrationen:

- Maskin utrustas med ett modulärt kabelrullesystem i prototypförande baserat på industriella komponenter, se Figur 59 och Figur 60. Detta för att utreda hur utveckling kan ske för att få ner kostnadsbilderna och leveranstider på subsystemet kabelrulle som på denna typ av maskiner vanligtvis är specialtillverkad.
- Detta kabelrullesystem jämförs med fast kabelanslutning och enklare hjälpmedel ämnat för förflyttning av kabel.
- Ett mindre mobilt energilagrar tas fram för att komplettera maskinen. Nätanslutna maskiner har idag en stor brist i att de är svåra att omlokalisera. Även om de arbetar i ett begränsat område så behöver maskinerna komma till service, tvättas eller flyttas till en ny arbetsstation. Stena Recycling har idag liknande maskiner där en påbyggnads diesel-motor löser problemet. Projektet ämnar med denna lösning attackera samma problem men lösa det emissionsfritt.

För att lösa ovan byggdes högspänningssystemet på maskinen om för att möjliggöra tester av alla ovan system. Systemet innefattar utöver kabelrullarna och den fasta anslutningen ett elskåp som säkerställer att strömmen bryts till båda kablarna om en kablarna av någon anledning kopplas ur.



Figur 58, Modulärt system för kabelrullar



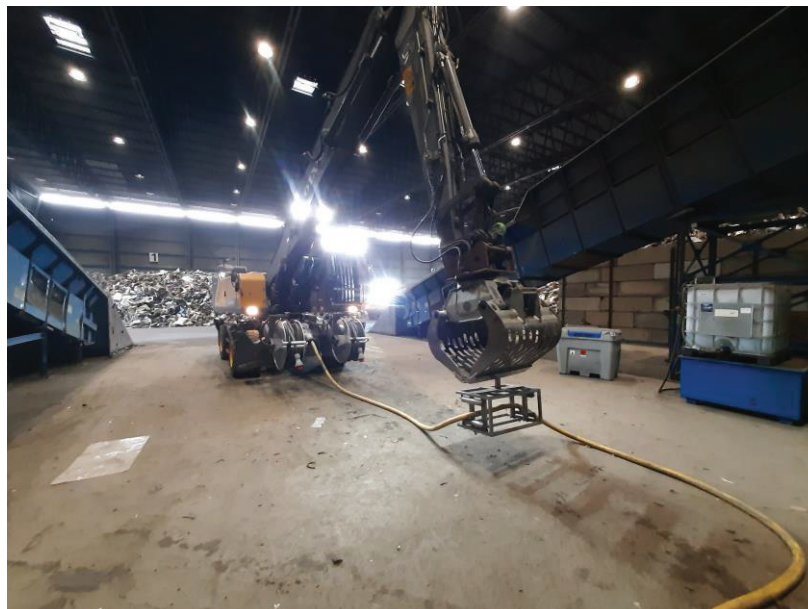
Figur 59, Systeminstallation

Samma elskåp innefattar även en brytare som maskinoperatören kan välja om maskinen skall matas med kabelrullarna (2x125A) eller den fasta anslutningen (1x250A).

Den utvalda applikationen i projektet var att mata försorterat material på två stycken matarband och hela tiden hålla processen igång. Maskinen som sådan klarade av att ersätta den ordinarie maskinen som i detta fall redan var en nätansluten materialhanterare.

Första veckan testades det modulära kabelrullesystemet. Detta system ersätter en 250A specialkabel med specialkabeldon med två standard 125A kablar med CEE-don. Och en stor specialtillverkad trumma med två mindre standardiserade industriella kabeltrummor. Utöver fördelar i kostnad och leveranstider medför detta system enklare hantering av kabeln vid till exempel förflyttning eller transport av maskinen. I denna tappning är systemet uppsatt med fjäderbelastade trummor för att testa en så enkel variant som möjligt och se hur den presterar i applikationen. Testerna med detta system var väldigt positiva. Farhågan på förhand var att det finns risk att kablarna kan tvinnas i varandra men i denna miljö på plant underlag fungerade systemet utan problem. Initialt fanns en plan att testa att montera kabelrullarna utanför maskinen i stället något som snabbt avfärdades då fjäderpaketet i kabelrullarna inte är starkt nog att rulla in och ut kabeln om dom inte färdas tillsammans med maskinen. I en så pass statisk applikation som denna upplevdes aldrig några problem med kabelrullarna – maskinoperatörerna testade att köra längre sträckor och sedan backa tillbaka och lät rullarna rulla upp sig själva utan problem. I mer dynamiska applikationer där kabel kan behöva matas ut för att ta sig runt hinder kan systemet uppdateras med motordrivna trummor, även med motoriserad styrning i sidled, i stället för fjäderbelastade, frihängande, trummor, vilket möjliggör fler frihetsgrader och utökad kontroll för operatören vad gäller in och utmatning av kabel.

Som ett ännu enklare komplement till kabelhanteringen testades en mindre lyftanordningskonstruktion tillsammans med den fast anslutna kabeln, se Figur 61. Input i den testade applikationen är att även denna lösning fungerar i en så pass statisk applikation men kabelrullesystemet föredras av operatörerna då det innebär att kabelhanteringen sker automatiskt, samt att inlärningstiden för att hantera trummorna var minimal, medan lyftanordningen krävde en del träning för *"att få kläm på att hantera lyftanordningen"*.



Figur 60, Lyftanordningskonstruktion

Utöver huvudapplikationen som beskrivits ovan så attackerar även projektet problematiken vad det gäller förflyttning av nätanslutna maskiner. Som beskrivits tidigare i rapporten så förekommer det nätanslutna maskiner som löser detta problem med diesel-genset eller i vissa fall med ett mindre inbyggt batteri på maskinen. I detta projekt har en ansats gjorts att försöka lösa denna problematik

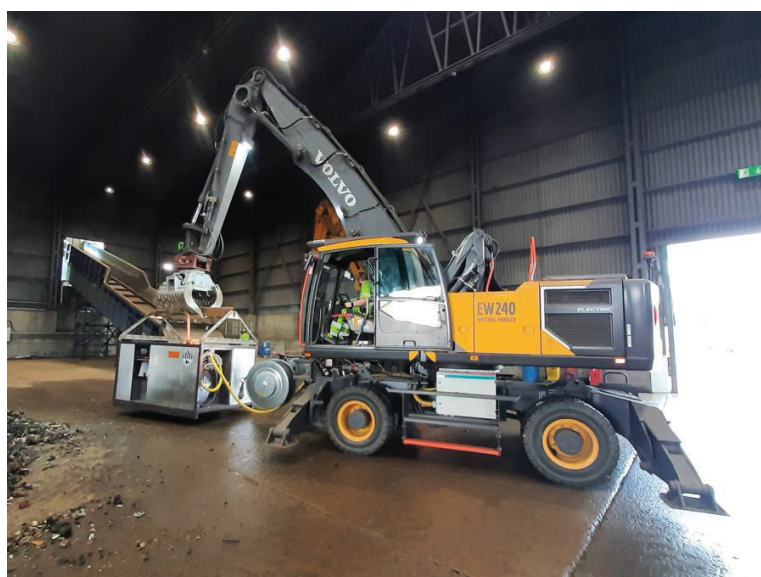
med hjälp av ett mindre energilagret designat för att kunna hanteras av materialhanteraren själv. På detta vis skapas flertalet fördelar jämfört med att bygga in ett batteri i maskinen:

- Möjligheten att dela energilagret mellan flertalet maskiner, se Figur 62. I Stena Recyclings fall finns ett flertal nätslutna maskiner som i allra största del jobbar i ett begränsat område. Att planera och dela på ett energilagret i samband med att maskinerna behöver förflyttas för service eller tvättning är fullt genomförbart. Detta skulle resultera i ett mycket högre batteriutnyttjande samt lägre systemkostnad och miljöpåverkan, en betraktelse och jämförelse kring de olika systemen återfinns i kapitlet som rör AP10.



Figur 61, System med delning av batterilagret mellan maskiner

- Att separera energilagret från maskinen innebär dessutom att energilagret kan placeras på lämpligt ställe. Hos Stena Recycling kommer säkerhet först – detta kan till exempel ses i rutinen att batterielektriska maskiner aldrig laddas eller parkeras vid materialet för att reducera risker. Detta förfarande underlättas avsevärt om maskinen inte har några inbyggda batterier.
- Även vad det gäller robusthet och servicebarhet har detta system sina fördelar. Genom att inte bygga in batterier i maskinen så minskar antalet artiklar som kan falla. Om batterienheten är separat och fallerar så innebär detta även att den kan bytas ut enkelt, medan ett batterihaveri på ett inbyggt batteri kräver större reparation. Denna typ av enhet lämpar sig även för andra affärsmodeller så som Energy As A Service där kunden kan köpa sig extra säkerhet i form av att köpa tjänsten och få garanti på att en leverantör snabbt byter ut enheten vid eventuella fel.



Figur 62, Test av mobilt energilagret

Även i praktiken så visade sig systemet prestera bra. Tester att förflytta maskinen från sin ordinarie arbetsstation genomfördes. Även tester att operera maskinen matad från energilagret genomfördes med lyckat resultat, se Figur 63. Så som energilagret som utvecklats och testats i detta projekt så är huvudsyftet att förflytta maskiner mellan arbetsstationer men med 180kWh tillräcklig energi, finns möjlighet att operera maskin i 1-2h, för att till exempel lasta av en lastbil eller genomföra ett mindre arbete där det inte finns tillgång till nätanslutning.

Energilagret som testades i projektet hade en provisorisk lyftanordning som greppades med gripen på maskinen. Lyftanordningen fungerade tillräckligt bra för att testa och konstatera att konceptet fungerar men till en slutgiltig lösning behöver hantering av energilagret ses över så det kan ske med olika typer av verktyg (gripas, skopor, gafflar). Det anses även fördelaktigt att utreda om energilagret kan ha hjul för att kunna förflyttas som en släpvagn. Allt detta för att göra enheten flexibel och fungera i olika applikationer och miljöer.

## 7 Spridning och publicering

### 7.1 Kunskaps- och resultatspridning

Hur har/planeras projektresultatet att användas och spridas?	Markera med X	Kommentar
Öka kunskapen inom området	X	Samtliga i värdekedjan, från maskintillverkare till arbetsplatsägare och underentreprenör och underleverantörer har mognat kunskap inom området av emissionsfria, elektrifierade arbetsmaskiner och hur systemet runt ska sättas upp och fungera i dagliga operationen i verklig miljö hos slutanvändaren.
Föras vidare till andra avancerade tekniska utvecklingsprojekt	X	Lärdomar från fält har initierat projekt inom Volvo CE.
Föras vidare till produktutvecklingsprojekt	X	Lärdomar från fält har förts in till utvecklingsprojekt inom Volvo CE.
Introduceras på marknaden	X	Inom projekttiden lanserades både L120 conversion och EW240MH
Användas i utredningar/regelverk/ tillståndsärenden/ politiska beslut	X	Resultat från projektet bör ha implikationer på BAT, även utredningar ang. transport mobila energilagrar och installation av temporär effektutjämningsutrustning har inletts internt Volvo CE, för att i ett senare skede eventuellt ta diskussion med aktuell tillståndsgivare, för att underlätta transformeringen mot nollemission .

### 7.2 Publikationer

- **Konferensbidrag**, “*The financial implications for providers and customers of electrification and result-oriented business models*”, Kanzari A., Nehler H. & Rasmussen J., ICBS Servitization Conference in November 2022, Malaga, Spain.
- **Konferensbidrag**, “*Financial performance measurement of result-oriented circular business models: The case of electrification and assets-as-a-service*”, Kanzari A., Nehler H. & Rasmussen J., ESIAM conference on Performance Measurement and Management Control in September 2023, Barcelona, Spain.
- Inskickad **artikel** till vetenskaplig tidskrift, “*Financial performance measurement of result-oriented circular business models: The case of electrification and assets-as-a-service*”, Kanzari A., Nehler H. & Rasmussen J, Special issue “Between Circular Paralysis and Utopia: Organizational Transformations towards the Circular Economy” in *Organization & Environment*.



- Kanzari A., 2023, "Financial performance measurement supporting the transition towards circular business models", **Licentiatavhandling**, Linköpings universitet. (kommer att presenteras den 9:e november 2023, obs! addera DOI-länk när sådan finns).

## 8 Slutsatser och fortsatt forskning







Projektet ämnade att demonstrera hur emissionsfria elektrifierade arbetsmaskiner kan skalas till att bli praxis inom industriell materialhantering. Detta genom att utvidga systemgränserna till att innefatta systemtester innehållande maskin med kringssystem, så som laddsystem och energidistribution, samt arbetsplanering och användaracceptans. Att kunna hantera alla dessa ingående delar är svårt för företag i värdekedjan individuellt. Därför sattes detta konsortium ihop, för att säkerställa att systemet fungerar i verklig miljö, hos slutanvändare, inom tre olika applikationer; produktions-, process- och återvinningsindustri.

För att säkerställa att en speciallösning inte utvecklas, som enbart fungerar i en specifik miljö, för en specifik arbetsuppgift, demonstrerades fyra olika maskintyper på fyra olika arbetsplatser hos tre olika företag, med tre olika laddlösningar, samt två olika nätanslutningslösningar och två olika energilagerlösningar.

Slutsatsen och det sammanlagda resultatet av samtliga systemdemonstrationerna är att med de ändrade randvillkoren, då energität diesel överges till förmån för emissionslösningar som i sin natur är mindre flexibla på grund av energiinnehållsbegränsningar i batterier eller nätanslutningar, krävs en noggsammare planering, ofta med längre planeringshorisont. Utförs planering av arbetsplatsen, inklusive schemaläggning, givet arbetsuppgiften, finns tekniken att lösa uppgiften i samtliga testmiljöer emissionsfritt med hjälp av elektrifierade arbetsmaskiner. Viktigt är att randvillkoren på respektive arbetsplats, med given arbetsuppgift och operatörsbeteende, sätter systemlösningen. Det kan innebära att två arbetsuppgifter, som till synes äro lika till sin natur, kräver olika systemlösningar i form av energidistributionssystem och virtuella stödsystem. Ändock, med paletten av systemkomponenter testade inom projektet var varje enskild systemdemonstration lyckad, då produktionen upprätthölls med den föreslagna systemlösningen – emissionsfritt, vilket var målet med projektet.

Projektet var i mångt och mycket av tekniskt natur, varpå fokus lades på "proof-of-concept", det vill säga att bevisa att ny, emissionsfri teknik som löser uppgiften för slutanvändaren. Då detta anses bevisat, även om än dock i mindre skala med enstaka maskiner, så ses inte några större hinder för att skala upp detta till fullständiga arbetsplatser. Dock behövs fortsatt utredning kring hur detta kan påverka stabilitet på interna elnät och schemaläggning över en hel arbetsplats med upp mot 60 maskiner. Härav bör vidare forskning bedrivas inom skalbarhet för de demonstrerade systemen inom projektet. Detta gäller inte bara inom energiförsörjning och -distribution, utan även inom acceptans i användarledet, då det initialt kan vara viss skeptism till införandet av ny teknik, som begränsar användandet av maskin. Även om "proven-in-use", det vill säga att "testa och se att det fungerar" har fungerat lyckosamt i projektet, kan inte detta göras på alla arbetsplatser runtom i landet. Även projektet har skrapat på ytan vad gällande affärsmodeller anses det vara nyttigt med fortsatt forskning hur fullskalig implementation av elektrifierade arbetsmaskiner påverkar den fullständiga värdekedjan.

## 9 Deltagande parter och kontaktpersoner

Projektpart	Kontaktperson	Roll
	Andreas Hjertström Niklas Lindblom	Projektkoordinator Projektledare strategiska projekt
	Marika Björnum	Inköpschef
	Dennis Silvé	Platschef Slitefabriken
	Anders Jansson	Alternative Fuels Manager
	Niklas Lundin	Public Technology Collaboration Manager
	Mattias Lindahl	Professor inom produktrelaterat miljöarbete

## Referenser

- [1] Medium- and Heavy-Duty Vehicle Electrification-An Assessment of Technology and Knowledge Gaps, 2019. [info.ornl.gov/sites/publications/Files/Pub136575.pdf](http://info.ornl.gov/sites/publications/Files/Pub136575.pdf)
- [2] Rapport-fossilfrihet-for-arbetsmaskiner, WSP WSP Analys & Strategi för Energimyndigheten 170210, [www.energimyndigheten.se/globalassets/klimat--miljo/transporter/rapport-fossilfrihet-for-arbetsmaskiner-170210.pdf](http://www.energimyndigheten.se/globalassets/klimat--miljo/transporter/rapport-fossilfrihet-for-arbetsmaskiner-170210.pdf)
- [3] Licentiate thesis. Decarbonization of construction supply chains: Achieving net-zero carbon emissions in the supply chains linked to the construction of buildings and transport infrastructure, Ida Karlsson, 2020, Division of Energy Technology Department of Space, Earth and Environment, Chalmers University of Technology
- [4] [www.stenarecycling.se](http://www.stenarecycling.se)
- [5] [www.cementa.se/sv/nollvision2030](http://www.cementa.se/sv/nollvision2030)
- [6] [www.ellenmacarthurfoundation.org](http://www.ellenmacarthurfoundation.org)
- [7] [sciencebasedtargets.org](http://sciencebasedtargets.org)
- [8] [unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement](http://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement)
- [9] [www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/klimatlag-2017720\\_sfs-2017-720](http://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/klimatlag-2017720_sfs-2017-720)
- [10] [fossilfrittserige.se](http://fossilfrittserige.se)
- [11] [www.regeringen.se/regeringens-politik/globala-malen-och-agenda-2030/](http://www.regeringen.se/regeringens-politik/globala-malen-och-agenda-2030/)
- [12] Baumann, H., Tillman, A-M. 2004. *The Hithch Hiker's Guide to LCA. An orientation in Life Cycle Assessment Methodolgy and Application*, Lund, Sweden, Studentlitteratur.
- [13] Simapro. 2022. *LCA software for informed change-makers* [Online]. Available: <https://simapro.com/>
- [14] Ecoinvent. 2022. *Ecoinvent* [Online]. Available: <https://ecoinvent.org/>
- [15] Huijbregts, M.A.J., Steinmann, Z.J.N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A. & van Zelm, R. 2017. ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact

- assessment method at midpoint and endpoint level. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22, 138-147.
- [16] Carlson, A., Divina, F. 2023.
- [17] Dai, Q., Kelly, J. C., Gaines, L. & Wang, M. 2019. Life Cycle Analysis of Lithium-Ion Batteries for Automotive Applications. *Batteries* [Online], 5.
- [18] Our world in data. 2023. *Electricity mix* [Online]. Available: <https://ourworldind3.org/electricity-mix>
- [19] da Silva Lima, L., Quartier, M., Buchmayr, A., Sanjuan-Delmás, D., Laget, H., Corbisier, D., Mertens, J., Dewulf, J. 2021. Life cycle assessment of lithium-ion batteries and vanadium redox flow batteries-based renewable energy storage systems. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 46, 101286.
- [20] [https://www.volvoce.com/-/media/volvoce/global-site/products-and-services/environmental-declarations/lca\\_cfp-methodology-volvo-ce-20230127.pdf?v=tG5nPw](https://www.volvoce.com/-/media/volvoce/global-site/products-and-services/environmental-declarations/lca_cfp-methodology-volvo-ce-20230127.pdf?v=tG5nPw)
- [21] <https://www.volvoce.com/-/media/volvoce/global-site/products-and-services/environmental-declarations/carbon-footprint-electric-excavator-2023-10-23.pdf?v=BuRpPw>
- [22] [https://www.volvoce.com/-/media/volvoce/global-site/products-and-services/environmental-declarations/carbon-footprint-excavator-ec200\\_ec210\\_ec220\\_ec250\\_ec300-2023-10-23.pdf?v=BuRpPw](https://www.volvoce.com/-/media/volvoce/global-site/products-and-services/environmental-declarations/carbon-footprint-excavator-ec200_ec210_ec220_ec250_ec300-2023-10-23.pdf?v=BuRpPw)
- [23] [https://www.volvoce.com/-/media/volvoce/global-site/products-and-services/environmental-declarations/lca\\_cfp-methodology-volvo-ce-20230127.pdf?v=tG5nPw](https://www.volvoce.com/-/media/volvoce/global-site/products-and-services/environmental-declarations/lca_cfp-methodology-volvo-ce-20230127.pdf?v=tG5nPw)