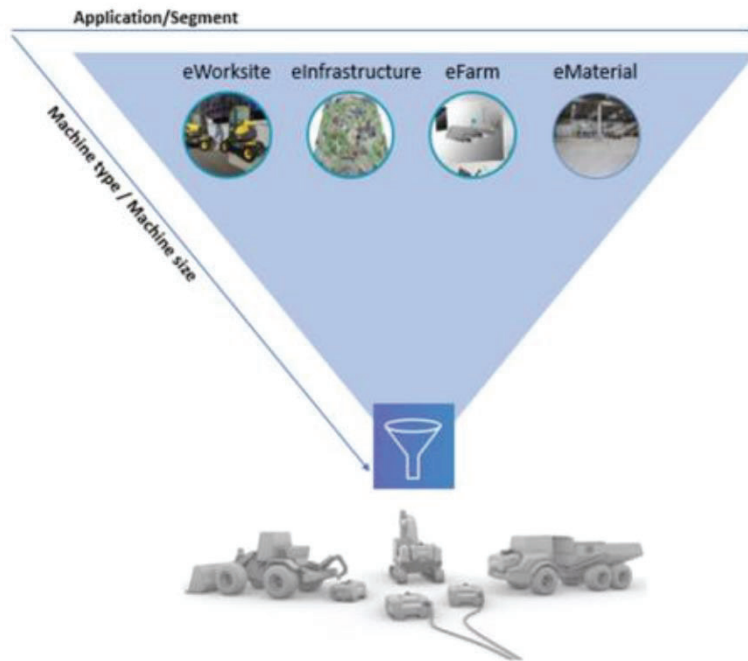


Publik rapport

# Converge

En lösning för energidistributionen inom vägbyggnation



Författare: Andreas Hjerström  
Datum: 2023-09-29  
Projekt inom: Vinnova FFI – Accelerera (Förstudie)

**FFI** Fordonsstrategisk  
Forskning och  
Innovation

VINNOVA

Energimyndigheten

TRAFIKVERKET

FKG

VOLVO

SCANIA

VOLVO

SCANIA

VOLVO

SCANIA

VOLVO

# Innehållsförteckning

<b>1 Sammanfattning .....</b>	<b>3</b>
<b>2 Executive summary in English.....</b>	<b>3</b>
<b>3 Bakgrund.....</b>	<b>4</b>
<b>4 Mål .....</b>	<b>6</b>
<b>5 Resultat och måluppfyllelse .....</b>	<b>6</b>
5.1 Arbetspaket 1 Projektledning .....	6
5.2 Arbetspaket 2 Kravspecifikation siteperspektiv .....	6
5.3 Arbetspaket 3 Kravspecifikation maskinsystemperspektiv .....	11
5.4 Arbetspaket 4 Elnätsanalys / Förutsättningar (LTH) .....	12
5.5 Arbetspaket 5 Identifiera samarbetspartners .....	16
5.6 Kunskaps- och resultatspridning .....	16
5.7 Publikationer.....	17
<b>6 Slutsatser och fortsatt forskning .....</b>	<b>17</b>
<b>7 Deltagande parter och kontaktpersoner.....</b>	<b>18</b>
<b>8 Referenser.....</b>	<b>18</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

Sverige har åtagit sig att möta Parisavtalet genom att sänka utsläppen av växthusgaser till netto noll 2045. Projektet CONVERGE inriktar sig på transporter i anläggningsbranschen, en bransch som i sin helhet använder 35% av global producerad energi och släpper årligen ut 40% av koldioxiden till atmosfären. Idag kommer ca 6% av Sveriges lokala utsläpp från arbetsmaskiner, där bygg och anläggning står för knappt hälften av utsläppen. För entreprenader som färdigställs 2030 eller senare har Trafikverket inriktningen att 100 procent av den samlade energianvändningen till fordon och arbetsmaskiner ska bestå av el från förnybara energikällor eller hållbara biodrivmedel som inte omfattas av reduktionsplikt. Detta är en utmaning då det idag saknas en systemlösning för elektrisk energi för att förse en maskinflotta som har 1) hög användningsgrad och 2) klarar höga laster, d.v.s. hanterar ett stort antal ton och med större maskinstorlek, ca 30 ton. Om större beställare, så som Trafikverket ska kunna ställa krav på emissionsfria lösningar från entreprenören, måste vi säkra tillgången på en attraktiv systemlösning för energidistribution till och inom site. För att accelerera omställningen är det av stor vikt, att vi som starka aktörer i hela värdekedjan visar vägen för vad som är möjligt.

Förstudien CONVERGE samlar lärdomarna i tidigare och pågående elektrifieringsprojekt med ambitionen att leda till ett stort demonstrationsprojekt som hanterar identifierade utmaningar för större infrastrukturprojekt. Det övergripande målet var att skapa en systemlösning för användning och överföring av elektrisk energi till en maskinflotta genom utveckling och demonstration, av ett utbytessystem för batterier i ett flertal maskiner, s.k. Battery Swap. Projektet valde dock att inte gå vidare mot en fullskalig ansökan inom FFI Accelerera då mognaden av systemkonceptet inte är tillräckligt hög. Som ett resultat av förstudien har behovet av ett jämförande test mellan olika systemlösningar vara viktigt för att få en heltäckande analys.

I den föreslagna systemdemonstrationen som nu är inskickad till FFI Nollemmission ska maskinsystem, med självbytande batterienheter, testas mot motsvarande maskinsystem med inbyggda batterier. Ytterligare resultat från projektet är att vidare arbete inom cirkularitet och optimering av resurser i nya affärsmodeller samt anpassning av regelverk -och policy är viktiga för förmågan att ställa om. Sammantaget har projektet gjort dom förberedelser och som leveranser i arbetspaket 1-5, för att påbörja projektet med en fullskalig systemdemonstration.

## 2 Executive summary in English

Sweden has committed to meeting the Paris Agreement by reducing greenhouse gas emissions to net zero by 2045. The CONVERGE project focuses on transport in the construction industry, an industry that as a whole uses 35% of global produced energy and annually releases 40% of carbon dioxide into the atmosphere. Today, approx. 6% of Sweden's local emissions come from work machines, with construction accounting for just under half of the emissions. For contracts that are completed in 2030 or later, the Swedish Transport Administration aims that 100 percent of the total energy use for vehicles and work machines must consist of electricity from renewable energy sources or sustainable biofuels that are not subject to reduction obligations. This is a challenge as there is currently a lack of a system solution for electrical energy to supply a machine fleet that has 1) high utilization rate and 2) can handle high loads, i.e. handle a large number of tons and with a larger machine size, approx. 30 tons. If larger clients, such as the Swedish Transport Administration, are to be able to demand emission-free solutions from the contractor, we must secure access to an attractive system solution for energy distribution to and within the site. To accelerate the transition, it is of great importance that we, as strong players in the entire value chain, show the way for what is possible.

The CONVERGE feasibility study gathers the lessons learned in previous and ongoing electrification projects with the ambition of leading to a large demonstration project that handles identified challenges for larger infrastructure projects. The overall goal is to create a system solution for use and transfer of electrical energy to a fleet of machines through the development and demonstration of an exchange system for batteries in several machines, so-called Battery Swap.

As a preparation, the project has among other things, mapped the conditions at demonstration sites, further developed decision support for system dimensioning, made a study for the consequences on the electricity grid and electricity infrastructure, and investigated the technical challenges for a common battery replacement unit for several different types of machines.

Battery-electric machines with built-in batteries have been compared with replaceable batteries, battery swap, where above all the criteria for battery swap have been developed within CONVERGE based on the Electrified Infrastructure Construction project [6]. With built-in batteries, fast charging is required at breaks, for this up to 11MW of charged power is required for the system of construction machines, depending on the choice of site energy storage, that figure can be reduced to 750kW evenly distributed over the day. In the case of battery swap, several machines share the same set of battery swap units that are charged evenly during the working hours, here the charging power is about 3MW with the smallest possible number of battery swap units, even this charging need can be reduced to 750kW with an increased number of battery swap units in systems for charging throughout the day. The total amount of batteries in the system can be halved with battery swap compared to built-in batteries.

It is of great importance to take a holistic approach to the energy system on a site where not only the machines as individual units are considered, but the degree of maturity of the entire system. To build knowledge about which systems are most beneficial in applications such as infrastructure construction and mining, different solutions, such as solutions with built-in batteries and replaceable batteries, need to be evaluated against each other in authentic projects were also important questions regarding environmental, financial and social considerations considered. Additional results from the project are that further work within circularity and optimization of resources in new business models as well as adaptation of regulations and policy are important for the ability to change.

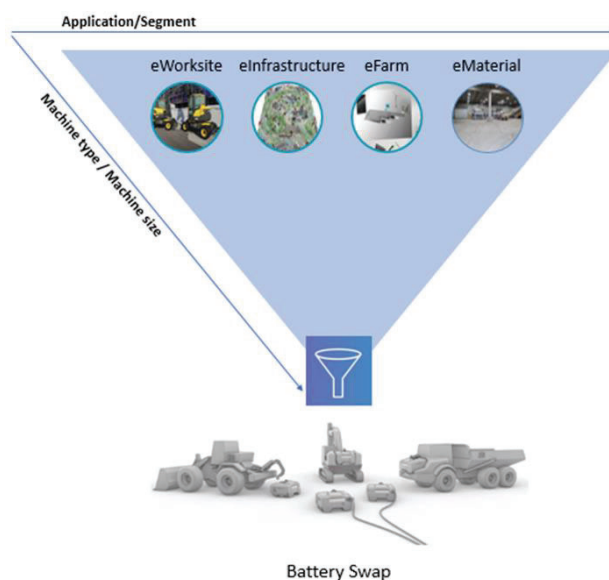
The constellation in the project has progressed, based on the results of this project, to a full-scale application within FFI Nollemission.

### 3 Bakgrund

Sverige med flertalet andra länder har åtagit sig att möta Parisavtalet [1] genom att sänka utsläppen av växthusgaser till netto noll 2045. I **projektet CONVERGE** inriktar vi oss på transporter i anläggningsbranschen, en bransch som i sin helhet använder 35% av global producerad energi och årligen släpper ut 40% av koldioxiden till atmosfären [2]. Idag kommer ca 6% av Sveriges lokala utsläpp från **arbetsmaskiner**, där bygg och anläggning står för knappt hälften av utsläppen [3, 4]. För entreprenader som färdigställs 2030 eller senare har Trafikverket inriktningen att 100 procent av den samlade energianvändningen till fordon och arbetsmaskiner ska bestå av el från förnybara energikällor eller hållbara biodrivmedel som inte omfattas av reduktionsplikt [5]. Detta är en utmaning då det idag saknas **systemlösning för elektrisk energi** för att förse en maskinflotta som har **1) hög användningsgrad** och **2) klarar höga laster** det vill säga hanterar ett stort antal ton och med större maskinstorlek, ca 30 ton. För att **accelerera omställningen**, d.v.s. bibehålla tidplan och budget med helt elektrifierade maskiner i ett större vägbygge har ett antal tidigare projekt<sup>1</sup> visat att det behövs en systemlösning för energidistribution till och inom siten.

I projektet Elektrifierad Infrastrukturbyggnation [6] visar data från en verklig anläggning hur konceptvalet är starkt beroende av tillgången till elnät och dess infrastruktur. Arbetsmaskinerna i infrastrukturprojekt rör sig över stora ytor, och har därmed speciella krav på eldistribution. En maskinlösning med inbyggda batterier skulle klara av att täcka ca 35% av maskinerna under förutsättningen man laddar under raster och natten utan produktionsbortfall. Den graden av elektrifiering motsvarar idag enbart 12% av CO2 utsläppen från maskinerna. Konsekvensen blir osäkerhet kopplat till laddning för de entreprenadföretag som ska ta klivet över till eldrivna arbetsmaskiner vilket kan försena hastigheten på klimatomställningen. Produktivitet i systemperspektivet (maskintillgänglighet och uptime) och användarvänlighet (ex. oro för laddtillgänglighet) behöver säkerställas. Även cirkularitet och optimering av resurser i nya affärsmodeller samt anpassning av regelverk -och policy är viktiga för förmågan att ställa om.

**Förstudien CONVERGE** samlar lärdomarna i tidigare och pågående elektrifieringsprojekt med ambition att leda till ett stort demonstrationsprojekt som hanterar identifierade utmaningar i större infrastrukturprojekt, se Figur 1. Det övergripande målet är att skapa en **systemlösning för användning och överföring av elektrisk energi** till en maskinflotta genom utveckling och demonstration av ett utbytessystem för batterier i ett flertal maskiner, s.k. **Battery Swap**.



Figur 1, I förstudien CONVERGE konvergerar lärdomar från tidigare utredningar till en gemensam lösning för större infrastrukturprojekt, samt för andra applikationer och sektorer.

**Battery swap** är en teknologi där urladdade batterier byts ut mot laddade. Hela systemet för teknologin behöver utvecklas och utvärderas i dess olika applikationer. Systemlösningen, med tillhandahållande av laddade batterier måste vara **robust** och maskinen helst kapabel att **byta batteri på sig själv**, utan hjälp av extern utrustning. Vidare bör systemlösningen täcka 100% av energidistributionen för maskinerna på en site, oavsett duty cycle eller vid drift 24/7, med en sammanlagd **batteribytetid** som motsvarar tankning av dieselmaskiner. Ett helelektriskt system av maskiner med battery swap behöver inte bära lika stora batterier vilket har en positiv miljöpåverkan genom **minskad total batterimängd** i systemet (eftersom laddning kan pågå hela tiden) och **ökad cirkularitet** (maskinens och batteriets livscykel isärkopplas). Systemlösningen öppnar även för **nya affärsmodeller** genom att batteriet kan hyras eller köpas, och ökad kundtrygghet då batterier snabbt kan ersättas eller uppgraderas. Sammantaget kan vi **accelerera** omställningen med denna lösning och främja att fler entreprenörer vågar ta steget till att elektrifiera. I och med detta kan t.ex. Trafikverket snabbare realisera kraven på emissionsfrihet.

## 4 Mål

Det övergripande målet är att skapa en systemlösning för användning och överföring av elektrisk energi till en maskinflotta genom utveckling och demonstration av ett utbytessystem för batterier i ett flertal maskiner, s.k. Battery Swap.

Denna förstudie kommer att; (1) kartlägga förutsättningarna för lämpliga demonstrationsplatser, (2) göra en fördjupad studie för konsekvenserna på elnätet och elinfrastrukturen på site, (3) fortsatt utveckling av virtuell beslutsstöd för systemdimensionering, (4) utföra en teknisk studie på rimligheten gällande gemensam battery swap för systemdemonstrationen, (5) identifiera och skapa samverkan med ytterligare aktörer, (6) ta fram en initial projektbeskrivning för test- och systemdemonstrationsprojektet. Minst tre maskiner av fler än ett maskinslag kommer att demonstreras vid en vägbyggnation.

## 5 Resultat och måluppfyllelse

I förstudien har parterna tillsammans byggt mycket värdefull kunskap för att kunna ta steget till en fullskalig systemdemonstration. Nedan följer en beskrivning av vad som gjorts i projektet, samt resultat och reflektion kring de många lärdomar parterna har fått genom projektet. Projektet valde dock att inte gå vidare mot en fullskalig ansökan inom FFI Accelerera då mognaden av systemkonceptet inte är tillräckligt hög. En ansökan har i stället lämnats in till FFI Nollemission.

### 5.1 Arbetspaket 1 Projektledning

Under hela projektet har det varit en kontinuerlig uppföljning i veckomöten, samt ytterligare vid behov. Rapportering och framdrift har i övrigt fungerat enligt plan.

### 5.2 Arbetspaket 2 Kravspecifikation siteperspektiv

För att stärka analysen som utfördes i Electric Infrastructure studien [6], vilken gjordes primärt på Bälinge-Vårgårda med fokus på anläggningsmaskinernas användning och positionering, se Fig2, kompletterades denna analys med en betraktelse av elektrisk infrastruktur på vägsträckan Lösen-Jämjö. Uppsättningen av maskiner kan slarvigt generaliseras till just den från Bälinge-Vårgårda och likväl placeras på sträckan Lösen-Jämjö, båda är 15km ny vägsträcka.





Figur 2, Vårgårda site

Fokus i analysen lades då på en nulägesanalys på elinfrastrukturen idag, för att sedan utföra en gap-analys på hur det skulle förändras om samtliga anläggningsmaskiner var elektrifierade. Det visar sig att elinfrastrukturen är påtaglig och tämligen utbyggd redan idag på ett större infrastrukturprojekt, så som Jämjö-Lösen, se Fig3.



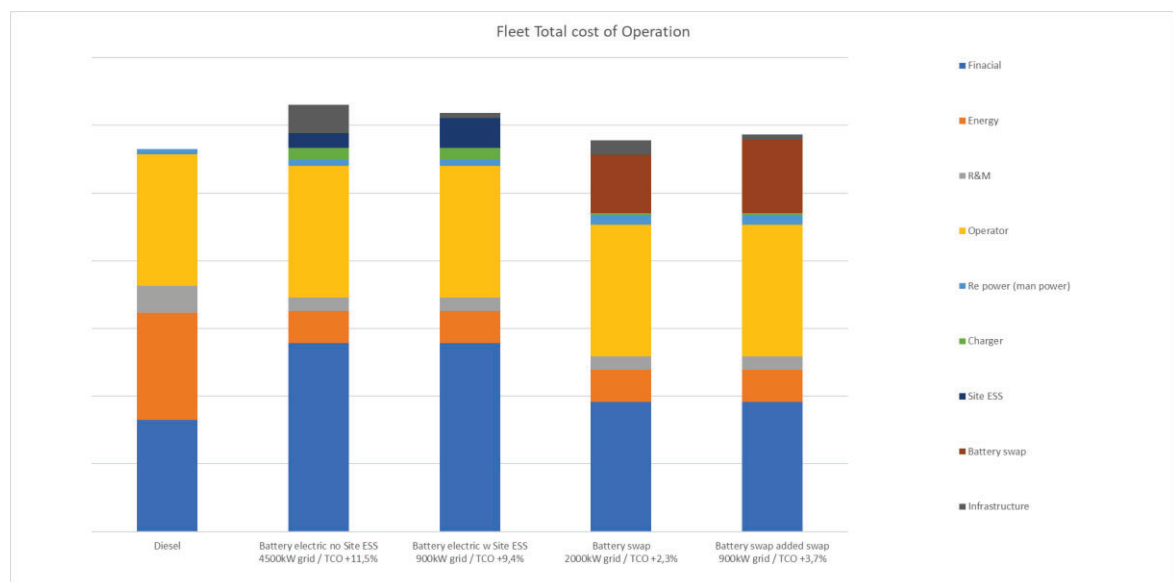
Figur 3, Infrastrukturprojekt et Jämjö-Lösen

För en typisk vägsträcka med ett stort antal arbetsmaskiner som de 39 i detta exempel har en stor energiförbrukning, dagens dieselmaskiner har en typisk förbrukning på drygt 5000 liter per dag (D50) med upp till 7000 liter under en intensiv arbetsdag (D10). För de batterielektriska alternativen med inbyggda batterier och med battery swap system finns utrymme att anpassa behovet efter tillgången på elektricitet, i fallet med inbyggda batterier med hjälp av site batterier (typiskt containrar) och i battery swap fallet endera med battericontainrar eller med ökat antal battery swap enheter. I slutänden blir det avvägning utifrån faktisk tillgång på elektrisk energi/effekt och storleken på energilager där det renaste systemet med inbyggda batterier dimensionerat mot ett tufft arbetspass (D10) landar på 11MW för snabbbladning av maskinerna

på lunchrast medan i battery swap fallet maxeffekten för samma tuffa arbetspass (D10) landar på 3MW för att säkerställa tillräcklig tillgänglighet på laddade battery swap enheter.

I båda fallen är medeleffekten över 24h en typisk arbetsdag (D50) uppskattad till 730kW. Studeras Fig. 3 noggrant erhålls en strömanslutning på cirka 1500A, vilket motsvarar cirka 1000kW. Närmare analys må utföras över schemaläggningen på de laster som effekten är framdragen till idag är idag, hur den schemaläggningen kan förändras och vilken effekt som i så fall behövs extra för en arbetsplats som Jämjö-Lösen. För fallet med inbyggda batterier krävs ca 2MWh site energilager för att jämna ut ladd effekten (primärt kort behov under frukost och lunch) utöver de 18MWh i maskinerna som till stor del laddas under natten för att nå 750kW, i fallet battery swap krävs 8MWh site energilager i form av extra battery swap enheter utöver de 9 MWh som utnyttjas för att hålla systemet rullande, i detta fall för att jämna ut effektbehov från dagen till dygnet.

En kostnadsbetraktelse TCO [kost/ton], Fig 4, är påbörjad för att få en bild av hur konkurrenskraftig de olika batteri elektriska lösningarna är, detta är fortfarande under arbete där osäkerheten fortfarande är stor, ambitionen är att jämföra industrialiserade system baserade på den teknik vi just nu jobbar med. Slutsatsen är att elektrifiera ett större vägprojekt är möjligt, rimligt och högst realiserbart.



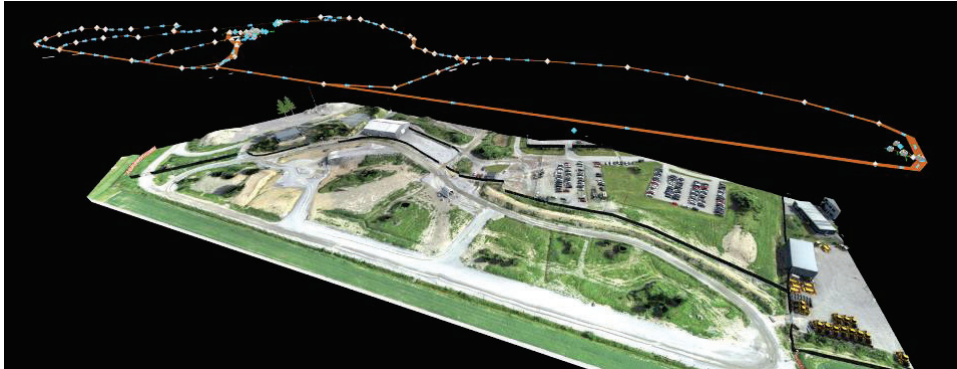
Figur 4, Kostnadsbetraktelse TCO

En viktig del som beslutsstöd för vilka lösningar som är mest attraktiva är simulering i tidiga faser. Det finns i huvudsak två sammankopplade simuleringsmetoder för att stödja design och utveckling av ovanstående elektrifierade lösningar baserade på användning av batteridrivna utrustning, och nedan redovisas de angreppssätt som använts för att verifiera koncept för att kunna gå in i nästa fas och testa i fullskala.

Diskret händelsesimulering (DES) har använts för att representera beteendet och prestandan för verkliga processer och utvärderar separata och diskreta händelser som äger rum under en period som förändrar ett systems tillstånd, Fig 5. Bland tillämpningarna för denna metod är simulering av fordonflottor och trängsel vid laddstationer. En DES-modell tillåter till exempel att i diskreta tidsintervall utvärdera beteendet hos en flotta av hybrid- eller elektriska maskiner och deras interaktion med en batteriladdnings- eller bytesstation. Konstruktionen av modellen följer ett antal steg inklusive definitionen av driftskontexten (t.ex. vägarna för fordonen), uppskattningen av energiförbrukningen och själva simuleringen av den diskreta händelsen. I det andra steget är det möjligt att implementera en dynamisk partikelmodell beroende på rutt- och fordonparametrar, för att uppskatta förbrukningen för varje resa. Slutligen, i den diskreta händelsesimuleringen,



varieras antalet batterier, laddningsplatser och maskiner i omlopp för varje scenario. Utifrån de erhållna resultaten baseras designbeslut på efterfrågan, servicekapacitet och batterianvändning.



Figur 5, Diskret händelsesimulering

Agentbaserad modellering (ABM) har använts för att prognostisera belastningen av laddstationer, t.ex. det som visas i Fig 6, för att bestämma den optimala positionen i ett system och generellt för att förbättra den effektiva användningen av elektrisk energi. ABM-metoden förutsätter att systemet är modellerat som en samling autonoma beslutsfattande enheter som kallas agenter. Varje agent bedömer sin situation individuellt och fattar beslut utifrån en uppsättning regler. Agenter kan utföra olika beteenden som är lämpliga för det system de representerar, Statecharts används i stor utsträckning för att specificera agenterns beteende, vilket gör det möjligt att grafiskt fånga olika tillstånd hos agenterna, övergångar mellan dem, händelser som utlöser dessa övergångar, timing och åtgärder som agenten gör under sin livstid.

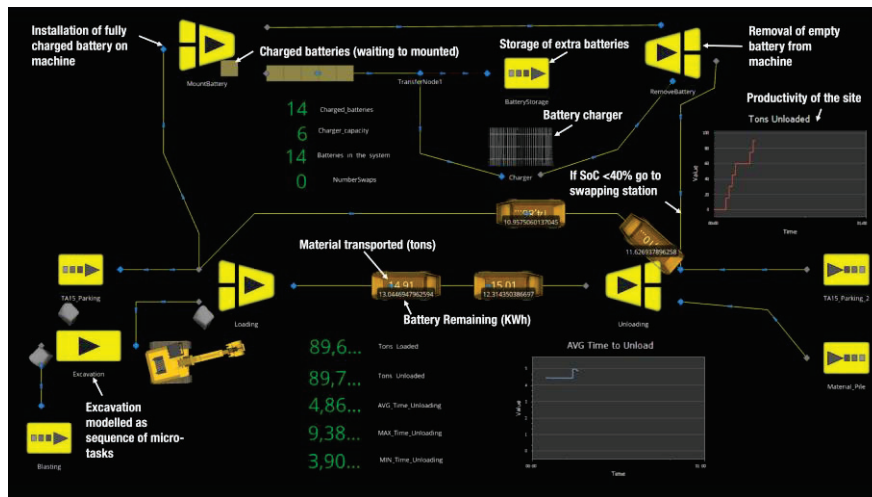


Figur 6, Agentbaserad modellering

Sådana konstruktioner som sammansatta tillstånd gör det möjligt att specificera sätt för agentdrift. Exempel från simuleringsmodeller kring elektriska (och till viss del autonoma) maskiner on site. Arbetet har fokuserat på utvecklingen av en batteribytesmodell i en utvald del av Jämjö-Lösen (vägbygge i Blekinge). Modellen är byggd i en kommersiell DES-mjukvara (SIMIO v15), som är programmerad med C#-programkod.

Fokus har varit på utvecklingen av en arbetsmodell där det är möjligt att simulera en lastning-avlastningscykel för en batteridrivna dumper. Modellen är designad för att göra det möjligt att simulera olika scenarier med avseende på batteribytesystemet, inklusive;

1. Ett varierande antal elmaskiner på platsen.
2. Olika batterikonfigurationer på en given maskin (t.ex. antal installerade kWh)
3. Olika kapaciteter för en given maskin (t.ex. antal transporterade ton)
4. Ett varierande antal uppgifter, samt vägval på platsen (att ta en maskin från punkt A till B, ta hand om eventuella 'störningar' på en väg).
5. Ett varierande antal batterier (monterade på maskinen eller "vilar", väntar på att bytas ut)
6. Ett varierande antal laddare, med olika laddningshastigheter.



Figur 7, Logisk modell Jämjö-Lösen



Figur 8, Logisk modell placerat på kartan

Modellen är helt anpassningsbar när det gäller att definiera egenskaperna förknippade med lastnings-/avlastningsuppgifter, såväl som med batteribytesoperationerna (t.ex. att variera behandlingstiderna, fördröjningstiderna, antalet supportoperatörer som behövs och mer).

Modellerna kompletteras med ett experiment, där scenarier definieras och vidare beräknas. OptQuest-optimizeren – ett valfritt tillägg för Simio simulering och schemaläggning – används vidare för att automatiskt identifiera det scenario som bäst uppfyller de specificerade målen för simuleringen (t.ex. produktivitet snarare än tillgänglighet eller total ägandekostnad). Optimizeren innehåller metaheuristik för att styra sin sökalgoritm mot bättre lösningar, vilket är att den kommer ihåg vilka lösningar som fungerade bra och kombinerar dem till nya, bättre lösningar.

Den logiska modellen, Fig 7, visar den underliggande simuleringsinställningen för batteribytesscenariot för ett segment (t.ex., för byggnationen av en bro i Ramdala-trakten, fig. 8). Detta lager av simuleringen fokuserar på de logiska relationerna mellan enheter, objekt och vägar; byggstenarna i DES-modellen. Här modelleras tre huvudenheter (d.v.s. passiva objekt, som genomgår förändringar under simuleringskörningen medan de passerar genom processen): maskinerna, materialet och batterierna. Deras flöde synkroniseras genom användning av specifika föremål, nämligen 'Combiners' och 'Separators', som gör det möjligt att till exempel lasta material på dumpern eller att ta isär batterierna från maskinen när man når växlingsstationen. På bilden är lastcykeln representerad i centrum genom användningen av en server som indikerar de aktiviteter som utförs av en grävmaskin när materialet lyfts från marken, och av ett

kombinator/separatorpar som representerar processen att lasta och lossa dumpern. På liknande sätt är växlingsstationen också modellerad av Combiner/Separator-paret, men i omvänd ordning. Batterierna är separerade från maskinen, laddade och när de är klara monterade tillbaka på dumpern. Laddningslogiken styrs av olika egenskaper, såsom antalet laddare och strömförsörjning i kW. Antalet batterier i systemet bestäms i början av simuleringskörningen och består av batterierna monterade på dumpern plus de som är redo att bytas (typiskt laddade), förvarade på en separat plats. SIMIO-modellen är vidare kopplad via API till MATLAB-miljön, för att göra det möjligt att länka platssimuleringarna till simuleringen av fordonens dynamik (t.ex. TA15-dumpen).

### 5.3 Arbetspaket 3 Kravspecifikation maskinsystemperspektiv

Volvo CE har börjat resan mot batterielektriska maskiner med början i kompakt segmentet med mindre hjullastare och grävmaskiner, dessa maskiner har inbyggda batterier med drifttid på ett antal timmar, ofta är det tillräckligt till dessa maskiner som ofta fungerar som servicemaskiner där arbetsdagen kan planeras utifrån maskinens tillgänglighet. För de arbetsmaskiner som typiskt används på ett större vägbygge eller liknande krävs större grad av systemtillgänglighet och flexibilitet, hur en sådan lösning kan se ut är utmaningen för detta projekt där två alternativ ställs mot varandra: #1 inbyggda batterier typ kompakt segments lösning eller #2 med batteri bytes system, ”battery swap”. I Electric Infrastructure studien [6] diskuterades också vätgas där både bränslecell och förbränningsmotor kan vara alternativ, för denna studie är dock vätgas exkluderat då potentialen bedöms större för batterielektriskt både ur systemverkningsgrad och flexibilitets perspektiv. Störst insats är lagd på battery swap då det konceptet har lägre mognadsgrad.

Grunden för denna studie bygger på den uppsättning entreprenadmaskiner som gjordes i Electric Infrastructure [6] med 39 maskiner bestående av grävmaskiner, hjullastare och dumptrar i storlek från 15 till 50 ton. Icke ”gula” maskiner är exkluderade från denna studie.

#### Inbyggda batterier

Med dagens (och förmodligen också morgondagens) teknologi finns det en praktisk och ekonomisk begränsning för hur mycket batteri det går att installera i entreprenadmaskiner med en begränsad drifttid mellan laddning som följd, denna studie är baserad på den teknologi Volvo CE kan erbjuda innan 2030, här landar det i en gång tid på mellan 5 och 8 timmar mellan laddning och en möjlighet till snabbaddning under planerad lunch, för systemet blir detta en hög laddeffekt vid lunch varför container lösning med batterier typ det vi i dag erbjuder till kompaktmaskinerna kommer att behövas för relativt höga laddeffekter (upp till 500kW) på ett nät med begränsad kapacitet.

#### Battery swap

Battery swap system finns för underjordsmaskiner och företrädesvis i Kina för personbilar och lastbilar, systemet för lastbilar i Kina utvecklas också för entreprenadmaskiner.



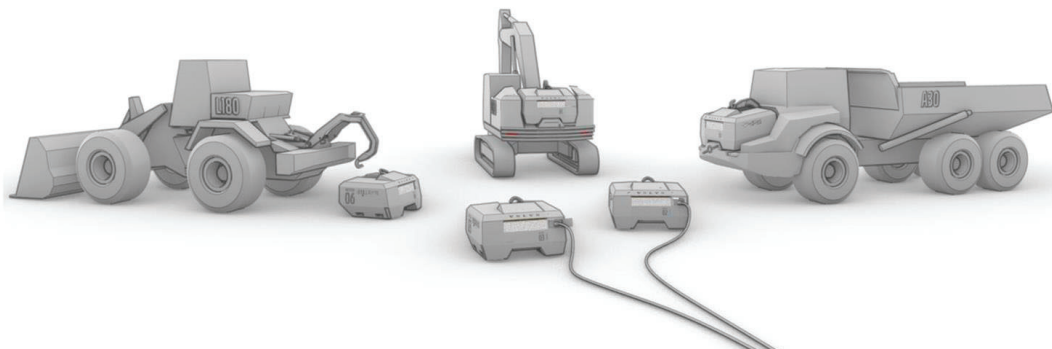
Figur 10, Battery swap maskin i Kina



Figur 9, Sany battery swap station



Den lösning som utvecklas i Kina bygger på att batteriet byts med hjälp av en kran, Fig 10, en servicemaskin eller en batteribytesanläggning, Fig 9, detta är för många applikationer en fullgod lösning men kan ibland vara en begränsning i flexibilitet [7]. Den lösning vi undersöker i denna studie bygger på att maskinen själv kan byta batteri för att erbjuda en så flexibel lösning som möjligt. För att ytterligare öka flexibiliteten är ambitionen att ha samma battery swap enhet för alla produktslag i ett antal storlekar för att ha en komplett range och att kunna dela batterier på en arbetsplats.



Utgångspunkten är att kunna erbjuda en systemlösning som är konkurrenskraftig med dagens diesel maskiner med avseende på systemtillgänglighet och prestanda och samtidigt erbjuda en lösning för noll utsläpp som bl.a. är;

- Gemensam lösning tvärs VCE program.
- 1,5 till 2h gångtid mellan batteribyten.
- Bytestid på 3min för hjulgående maskiner och 10 min för bandgående maskiner som ofta står i eländig terräng och behöver förflyttas en kortare sträcka för att utföra batteribyten. För en arbetsdag blir detta motsvarande störning som att tanka diesel.
- Maskinen kommer att ha ett batteri på maskinen för att möjliggöra rangering mm utan battery swap enhet på.
- Maskinerna ska ha lika eller bättre runtomskikt och maskinvikt som dagens maskin.
- Battery swap enhet kan laddas med kabel eller från en docka med samma interface som maskinen för att förenkla handhavandet i möjligaste mån

Med tilltänkta systemlösningar kommer en flotta av maskiner som i ett större vägbygge i detta exempel att kunna dela på batterier där några batterier är på maskiner medan andra står på laddning. Om nätet har begränsning i tillgänglig effekt kan antalet battery swap enheter ökas för att jämna ut laddeffekt över längre tid.

#### 5.4 Arbetspaket 4 Elnätsanalys / Förutsättningar (LTH)

Projektet inventerade lämpliga sträckor för en grov modellering av effektbehov i förhållande till effektutgång. Tio sträckor valdes ut varefter deras utsträckning i olika nätområden kartlades. Sträckorna och relaterade nätområden finns återgivna i Tabell 1.

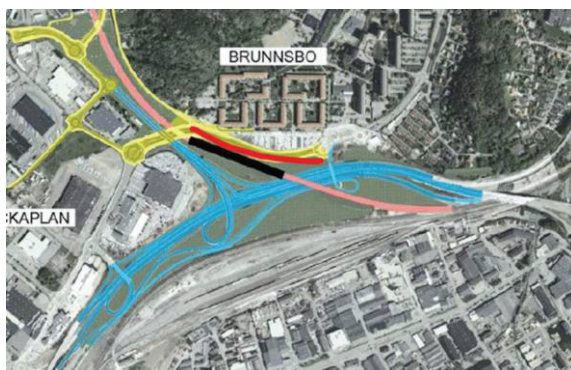
Tabell 1 Kartlagda sträckor med tillhörande nätområden.

Sträcka	Länk	Nätområde
Väg 40 Eksjö Nässjö	<a href="https://www.trafikverket.se/vara-projekt/projekt-i-jonkopingslan/vag-40-nassjoeksjo-motesfri-vag/">https://www.trafikverket.se/vara-projekt/projekt-i-jonkopingslan/vag-40-nassjoeksjo-motesfri-vag/</a>	NSO
		SMN
		ESJ
E20 Bälinge Vårgårda	<a href="https://peab.se/projekt/e20-alingsas-balinge--vargarda/">https://peab.se/projekt/e20-alingsas-balinge--vargarda/</a>	ALS
		SHD

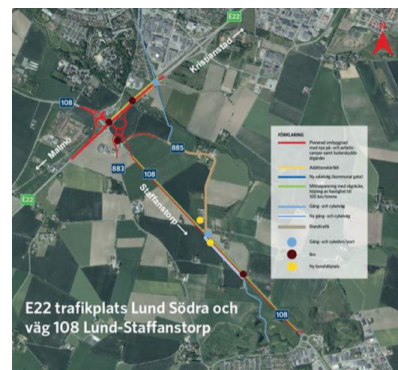
E22 Lösen-Jämjö	<a href="https://www.trafikverket.se/vara-projekt/projekt-i-blekinge-lan/e22-losenjamjo-motesfri-vag/">https://www.trafikverket.se/vara-projekt/projekt-i-blekinge-lan/e22-losenjamjo-motesfri-vag/</a>	KKA BLE
Tvärförbindelse Södertörn	<a href="https://www.trafikverket.se/vara-projekt/projekt-i-stockholms-lan/vag-259-tvarforbindelse-sodertorn/">https://www.trafikverket.se/vara-projekt/projekt-i-stockholms-lan/vag-259-tvarforbindelse-sodertorn/</a>	SOT UPS EKO STH HDG DRV
Lundbyleden	<a href="https://www.trafikverket.se/vara-projekt/projekt-i-vastra-gotalands-lan/e6.21-lundbyleden-gator-vid-backaplan-samt-bohusbanan-och-brunnsbo-station/lundbyleden-delen-brantingsmotet-ringomotet/">https://www.trafikverket.se/vara-projekt/projekt-i-vastra-gotalands-lan/e6.21-lundbyleden-gator-vid-backaplan-samt-bohusbanan-och-brunnsbo-station/lundbyleden-delen-brantingsmotet-ringomotet/</a>	GBG
Väg 63 Hjulsjö	<a href="https://www.trafikverket.se/vara-projekt/projekt-i-orebro-lan/vag-63-forbifart-hjulsoj/">https://www.trafikverket.se/vara-projekt/projekt-i-orebro-lan/vag-63-forbifart-hjulsoj/</a>	KOB
Norrbottniabanan	<a href="https://www.trafikverket.se/vara-projekt/projekt-som-stracker-sig-over-flera-lan/norrbottniabanan/">https://www.trafikverket.se/vara-projekt/projekt-som-stracker-sig-over-flera-lan/norrbottniabanan/</a>	UMA BYG SKT PIB LUL
E20 förbi Mariestad	<a href="https://www.trafikverket.se/vara-projekt/projekt-i-vastra-gotalands-lan/e20-motesfri-vag-vastra-gotaland/e20-forbi-mariestad/">https://www.trafikverket.se/vara-projekt/projekt-i-vastra-gotalands-lan/e20-motesfri-vag-vastra-gotaland/e20-forbi-mariestad/</a>	GBN MAI
Ostlänken	<a href="https://www.trafikverket.se/vara-projekt/projekt-som-stracker-sig-over-flera-lan/nya-stambanor-mellan-stockholm-goteborg-och-malmo/ostlanken-en-ny-dubbelsparig-jarnvag/">https://www.trafikverket.se/vara-projekt/projekt-som-stracker-sig-over-flera-lan/nya-stambanor-mellan-stockholm-goteborg-och-malmo/ostlanken-en-ny-dubbelsparig-jarnvag/</a>	LNK OGO NYD NYK VAG SDT
Lund Södra	<a href="https://www.trafikverket.se/vara-projekt/projekt-i-skane-lan/e22-trafikplats-lund-sodra-ombyggnad-av-trafikplatsen-med-ny-bro/">https://www.trafikverket.se/vara-projekt/projekt-i-skane-lan/e22-trafikplats-lund-sodra-ombyggnad-av-trafikplatsen-med-ny-bro/</a>	LUN

Notera att de flesta siter berör flera nätområden, vilket komplicerar planeringsarbetet så man måste ha med flera nätägare att göra.

Efter att ha identifierat och kontaktat representanter för de olika nätområdena fick vi svar från två, med data över placeringar, märkeffekter och normal belastning för relevanta nätstationer.



Figur 11, Lund Södra



Figur 12, Lundbyleden / Brunnsbomotet



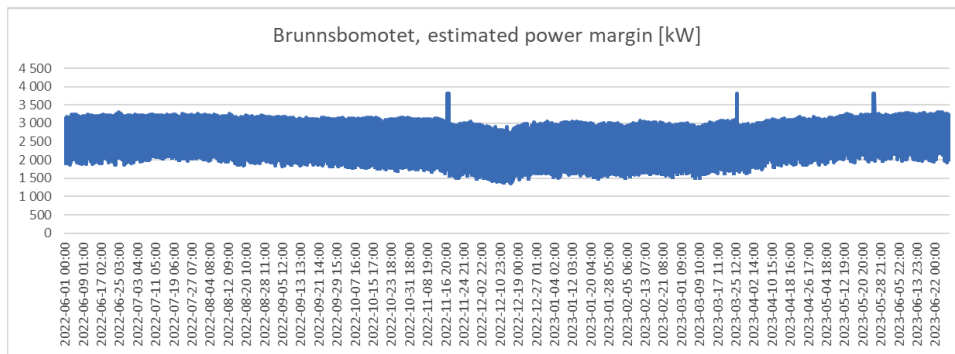
Dessa är Lundbyleden i Göteborg respektive Lund Södra i Lund. Figurer 11–12, visar vilka sträckor och områden som skall byggas/byggas om.

För att kunna göra en grov uppskattning av effekttillgången används den totala effekten per “site” som modellerades i Bälinge - Vårgårda i det tidigare projektet [6]. Där uppskattades en representativ site omspänna 1 km vägsträcka och populeras av maskiner som drar en medeffekt av tillsammans 750 kW under ett arbetspass på 11 timmar.

Båda de här modellerade siter har en fysisk utbredning av ungefär 1 km (uppskattad med hjälp av Google Maps). Därför antas även dessa siter behöva tillföras denna medeffekt. Från kontakterna i nätområdena har projektet tillgång till dels maximal tillåten belastning från aktuella nätstationer och fördelningsstationer, dels timupplöst data på hur dessa belastas under ett helt år. Med dessa indata som grund beräknas hur stor effektmarginal varje site har, baserat på maximalt tillgänglig effekt, övrig belastning och sitens uppskattade egna behov av 750 kW medeffekt per km.

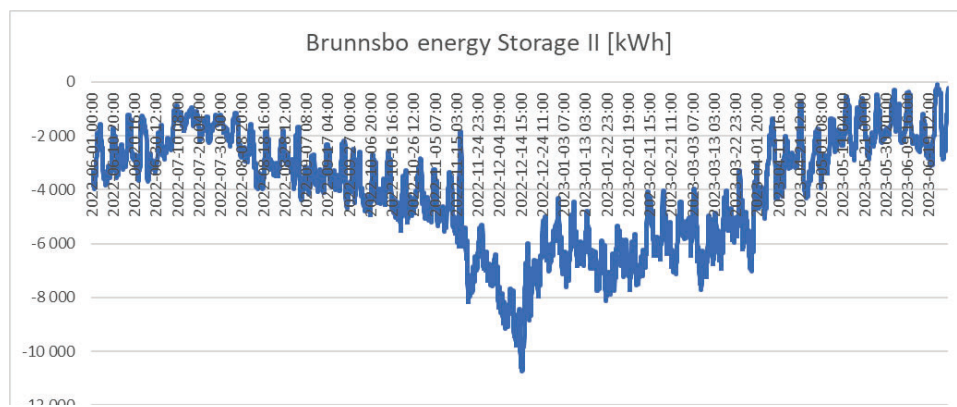
### Brunnsbomotet (Lundbyleden)

Nätstationerna vid Brunnsbomotet drivs från en nätstation som kan belastas med upp till 3,8 MW. Med antagandet att arbetsmaskinerna tillsammans drar 750 kW och den kända övriga nätbelastningen som varierar över året men aldrig överstiger 1,7 MW, så ser effektmarginalen för denna site ut som i Fig 13.



Figur 13, Uppskattad effektmarginal från närmaste 10 kV anslutning vid Brunnsbomotet i Göteborg.

Det finns alltså gott om effekt för att bestå med tim-medeffekt till fullt elektrifierade arbetsmaskiner. Om man däremot antar att de flesta arbetsmaskiner snabbbladdas vid t.ex. lunchraster på liknande sätt som rapporterats i projektet [6] för Bälinge-Vårgårda, så kan toppeffekten förhålla sig till timmedeffekten som 4:1. Det i sin tur betyder att laddeffekten under vissa timmar kan vara  $4 \times 750 = 3000$  kW. Det betyder att det dagligen behövs ett energilager av den storlek som visas i Figur 14.

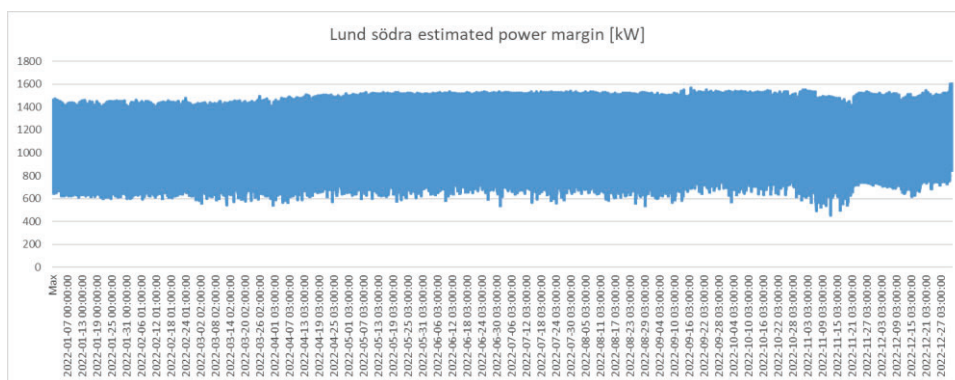


Figur 14, Behovsanalys energilager

Som visas i Fig 14 uppgår behovet av energilager till nästan 11 MWh under några veckor sommartid, men för övrigt är behovet huvudsakligen mindre än 6 MWh.

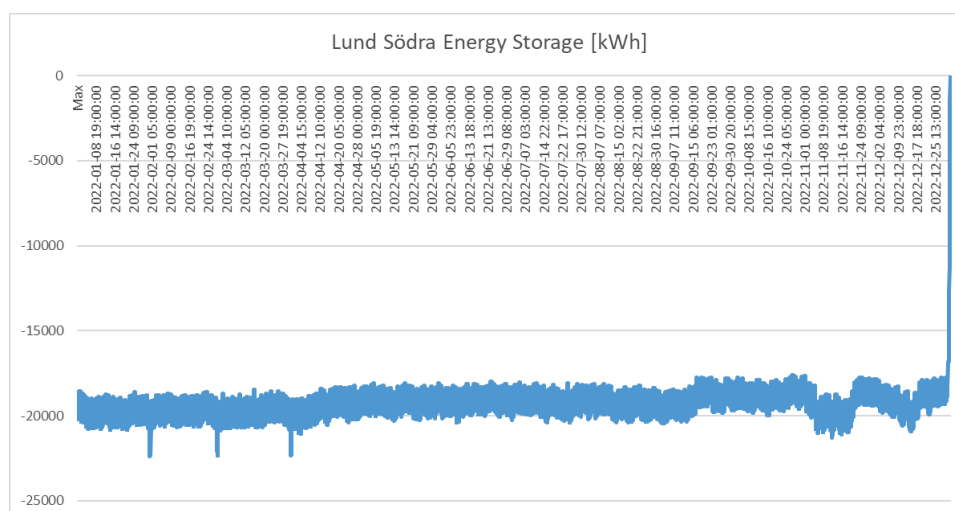
## Lund Södra

Nätstationerna vid Lund Södra drivs från en nätstation som kan belastas med upp till 5 MW. Med antagandet att arbetsmaskinerna tillsammans drar 750 kW och den kända övriga nätbelastningen som varierar över året men aldrig överstiger 1,6 MW, så ser effektmarginalen för denna site ut som i Fig 15.



Figur 15, Uppskattad effektmarginal från närmaste 10 kV anslutning vid Lund Södra

Det finns alltså gott om effekt för att bestå med tim-medeffekt till fullt elektrifierade arbetsmaskiner. Om man däremot antar att de flesta arbetsmaskiner snabbbladdas vid t.ex lunchraster på liknande sätt som rapporterats i projektet [6] för Bälunge-Vårgårda, så kan toppeffekten förhålla sig till timmedeffekten som 4:1. Det i sin tur betyder att laddeffekten under vissa timmar kan vara  $4 \times 750 = 3000$  kW. I Lund Södra tas effekten från fördelningsstationen, som är begränsad till 5 MW, ut via två stycken 800 kW nätstationer, som alltså tillsammans har en max tillgänglig effekt på 1600 kW. Med denna begränsning, dvs utan att utnyttja fördelningsstationen till er än 1600 kW, skulle det alltså behövas ett energilager på upp till 20 MWh, Fig 16. OM däremot fördelningsstationen kapacitet utnyttjas upp till 5 MW så behövs inget lokalt energilager alls, så länge laddeffekten inte överstiger 3 MW ( $4 \times 750$  kW).



Figur 16, Uppskattning av det nödvändiga energilagrets storlek, timme för timme, om de använda nätstationernas maxeffekt begränsas till  $2 \times 800$  kW.

Om kapaciteten hos den fördelningsstation nätstationerna är ansluten till utnyttjas fullt ut (5 MW), så behövs ingen lokal lagring alls.

### Slutsats från elnätsstudierna

Eftersom de verkliga arbetscyklerna för de två studerade siterna inte är kända, antas här att samma medeleffekt per site används som på en site från sträckan Bälunge-Vårgårda. Denna medeleffekt är c:a 750 kW och en site uppskattas till att täcka 1 km. Eftersom båda de modellerade siterna (Lundbyleden och Lund Södra) är c:a 1 km stora antas medeleffekten där vara 750 kW.

Vad studien visar är att i båda fallen finns det alltid en effektmarginal till största tillgängliga effekt, vilken är 3,8 MW vid Lundbyleden och 5 MW vid Lund Södra, förutsatt att de involverade arbetsmaskinerna drar 750 kW konstant under sitt 11 timmar långa arbetspass.

OM maskinerna däremot snabbbladdas vid t.ex. lunch, och då precis som i studien av Bälunge-Vårgårda under lunchtid drar fyra gånger högre effekt än medeleffekten (dvs  $4 \times 750 = 3 \text{ MW}$ ), så kommer siten vid Lundbyleden att behöva ett energilager upp till 11 MWh och siten vid Lund Södra att behöva 0 MWh. I fallet med Lund Södra antas då att den maximala laddeffekten är begränsad av idag tillgängliga nätstationer (sammanlagt 1600 kW). OM effekten i stället begränsas av närmaste fördelningsstation (5MW) behövs det inget batterilager i Lund Södra.

Den övergripande slutsatsen från denna förstudie är att så snart effektuttaget för en båda de modellerade siterna överstiger endera fördelningsstationens eller tillgängliga nätstationers effekt så behövs ett energilager av storleksordningen några MWh. Laddeffekten överstiger dessa effektgränser om någon nivå av snabbbladdning används. Med enbart snabbbladdning behövs störst energilager. Med någon nivå av batteribyteteknik involverade minskar behovet av lokala energilager för att stötta elnätet, men för att uppskatta denna minskning krävs en mer detaljerad modellering av antalet involverade maskiner och deras arbetscykler.

## 5.5 Arbetspaket 5 Identifiera samarbetspartners

Har gått vidare till en full ansökan inom FFI Nollemission med den nu ingående projektkonstellationen samt Mälardalens Universitet som ny partner med fokus på hållbarhet och affärsmodellinnovation. Då vi i dagsläget in vet fullt ut vilken demonstrationssite från PEAB som kommer vara aktuell och tillgänglig för projektet har ingen nätägare tagits med som formell part men kommer att identifieras och blandas in under projektet. Erfarenheter visar att det också kan bli aktuellt att involvera leverantörer av infrastrukturutrustning på site.

## 5.6 Kunskaps- och resultat spridning

Hur har/planeras projektresultatet att användas och spridas?	Markera med X	Kommentar
Öka kunskapen inom området	X	Kunskapen har spridits och kommer att fortsätta spridas genom det fortsatta planerade projektet. Medverkan av de akademiska parterna möjliggör ytterligare spridning och kunskapsbyggande. -Deltagande i Cleancon av flera parter, där kompetensbildning ifrån både projekten inneburit kompetensspridning för arbetet med/mot emissionsfria infrastrukturprojekt -Peab har haft interna konferens där fortbildning inom möjligheter med emissionsfria maskiner har spridits.
Föras vidare till andra avancerade tekniska utvecklingsprojekt	X	Ansökan om fortsättningsprojekt är inskickad till FFI Nollemission.

		-Projektmedlemmar har fungerat som rådgivande i Trafikverkets framtagande av emissionsfria entreprenader -Projektmedlemmar har fungerat som rådgivande i pågående emissionsfria infrastrukturprojekt i Stockholm
Föras vidare till produktutvecklingsprojekt		
Introduceras på marknaden		
Användas i utredningar/regelverk/ tillståndsärenden/ politiska beslut		

## 5.7 Publikationer

Inom tiden för projektet har en publikation skapats. Fler publikationer kommer i efterhand då publicering av vetenskapliga publikationer ofta har en fördröjning på 9-18 månader efter resultaten är skapade.

Bertoni, M. (2024). A Discrete Event Simulation approach to support the design of battery swap solutions in the construction industry. Submitted to NordDesign 2024, Reykjavik, Iceland, 12-14 August 2024.

## 6 Slutsatser och fortsatt forskning

Förstudien, har bl.a. kartlagt förutsättningarna på demonstrationsplatser, vidareutvecklat beslutsstöd för systemdimensionering, gjort en studie för konsekvenserna på elnätet och el-infrastrukturen, samt undersökt de tekniska utmaningarna för en gemensam batteribytesenhet för flera olika maskinslag.

Batteri-elektriska maskiner med inbyggda batterier har jämförts med utbytbara batterier, battery swap, där framför allt kriterierna för battery swap har utvecklats inom CONVERGE utifrån projektet Elektrifierad Infrastrukturbyggnation [6]. Med inbyggda batterier krävs snabbbladning på raster, för detta krävs upp till 11MW ladd effekt för systemet av entreprenadmaskiner, beroende på val av site energilager kan den siffran minskas ner till 750kW utjämnat över dygnet. I fallet med battery swap delar flera maskiner på samma uppsättning battery swap enheter som laddas jämt under arbetstiden, här landar ladd effekten på ca 3MW med minsta möjliga antal battery swap enheter, även detta ladd behov kan minska ner till 750kW med utökat antal battery swap enheter i system för laddning jämt över dygnet. Totala mängden batterier i systemet kan halveras med battery swap jämfört med inbyggda batterier.


Förståelsen för tillgänglig elektrisk infrastruktur har ökat i CONVERGE projektet. Det har inte varit helt enkelt att få in all nödvändig information, men från projektet Jämjö-Lösen beskrivet i kap 5.2 framgår att byggströmmen för de kranar och annat som används över vägsträckan summerar till 1MW vilket är i nivå med det behov som finns med site energilager. Analyserna i kap 5.4 indikerar att det finns överkapacitet i nätstationerna på vägsträckan Brunnsbomotet med 2,1MW och Lund Södra på 3,4MW. Varje projekt är unikt men de axplock som analyserats tyder på att det kan finnas effekt i nivå med behovet för Battery swap utan extra utjämning av effekten, i fallet med inbyggda batterier tyder analysen på att site energi lager behövs för att balansera ut toppar vid raster eller att arbetsdagen planeras så att maskiner kan laddas på olika tider. Den enklare TCO analysen indikerar att entreprenadmaskiner med battery swap kan erbjuda samma prestanda och tillgänglighet som dagens diesel maskiner med en marginell ökning av kostnaderna.

Både för inbyggda batterier och battery swap finns ett behov av planeringsstöd för att prioritera maskiners laddning och battery bytes schemulering, i de fall där effekttillgängligheten måste behövas för entreprenadmaskiner dessutom planeras tillsammans med övriga förbrukare.

Det är av stor vikt att ta ett helhetsgrepp för energisystemet på en site där inte bara maskinerna som enskilda enheter beaktas, utan mognadsgraden på hela systemet. För att kunna bygga kunskap om vilka system som är mest fördelaktiga i applikationer som infrastrukturbyggnation och bergtäkter, behöver olika lösningar, så som lösningar med inbyggda batterier och utbytbara batterier, utvärderas mot varandra i autentiska projekt där även viktiga frågeställningar kring miljö, finansiell och social betraktelse beaktas.

Även fortsatt forskning kring de olika aktörernas roller i värdekedjan, hållbara affärsmodeller, legala hinder/möjligheter, samt framtida kravbild mot energileverantörer gällande energidistribution är centralt för en accelererad utrullning av emissionsfria anläggningsmaskiner. Konstellationen i projektet har gått vidare, utifrån resultaten i detta projekt, till en fullskalig ansökan inom FFI Nollemission.

## 7 Deltagande parter och kontaktpersoner

	Andreas Hjertröm	Ansvarig för myndighetskontakt och projektledning
	Anders Engström	Bitr. Arbetschef med utvecklingsansvar
	Tobias Larsson	Professor, Mechanical Engineering
	Mats Alaküla	Professor, Industrial Electrical Engineering

## 8 Referenser

- [1] <https://www.naturvardsverket.se/parisavtalet/>
- [2] <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/europe-transportation-infrastructure-construction-market>
- [3] Arbetsmaskiners klimat- och luftutsläpp (naturvardsverket.se)
- [4] <https://www.naturvardsverket.se/data-och-statistik/klimat/vaxthusgaser-utslapp-fran-arbetsmaskiner/>
- [5] <https://bransch.trafikverket.se/contentassets/44bef645d324465ca2f8030925782e8c/rapport-kravstallning-for-fossilfria-arbetsplatser-003.pdf>
- [6] [https://fudinfo.trafikverket.se/fudinfoexternwebb/Publikationer/Publikationer\\_005701\\_00580/Publikation\\_005791/Slutrapport%20Elektrifierad%20Infrastrukturbyggnation%20inkl.%20bilagor.pdf](https://fudinfo.trafikverket.se/fudinfoexternwebb/Publikationer/Publikationer_005701_00580/Publikation_005791/Slutrapport%20Elektrifierad%20Infrastrukturbyggnation%20inkl.%20bilagor.pdf)
- [7] <https://www.idtechex.com/en/research-report/battery-swapping-for-electric-vehicles-2022-2032-technology-players-and-forecasts/868>