Elektrifierade arbetsmaskiner och deras laddinfrastruktur

Delstudie kring läge och utmaningar

Svetla Käck
Jonas Jansson

vti

VTI rapport 1222
Utgivningsår 2024
vti.se/publikationer

VTI rapport 1222

Elektrifierade arbetsmaskiner och deras laddinfrastruktur

Delstudie kring läge och utmaningar

Svetla Käck

Jonas Jansson

vti

Översatt titel: Electrified working machines and their charging infrastructure. A study on status and challenges
Författare: Svetla Käck (VTI), Jonas Jansson (VTI)
Diarienummer: 2024/0183-8.1
Publikation (Publication): VTI rapport 1222
Utgiven av VTI 2024

Publikationsuppgifter – Publication Information

Titel/Title

Elektrifierade arbetsmaskiner och deras laddinfrastruktur. Delstudie kring läge och utmaningar / Electrified working machines and their charging infrastructure. A study on status and challenges

Författare/Author

Svetla Käck, (VTI, orcid.org/0000-0002-1413-1111)
Jonas Jansson, (VTI, orcid.org/0000-0002-0822-5701)

Utgivare/Publisher

VTI, Statens väg- och transportforskningsinstitut/
Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI)
www.vti.se/

Serie och nr/Publication No.

VTI rapport 1222

Utgivningsår/Published

2024

VTI:s diarienr/Reg. No., VTI

2024/0183-8.1

ISSN

0347–6030

Projektnamn/Project

Laddinfrastruktur för arbetsmaskiner, VTI del 1 i regeringsuppdrag till Naturvårdsverket. / Charging infrastructure for working machines, VTI part 1 in a government commission to the Swedish Environmental Protection Agency.

Uppdragsgivare/Commissioned by

Naturvårdsverket / Swedish Environmental Protection Agency

Språk/Language

Svenska /Swedish

Kort sammanfattning

Rapporten presenterar en delstudie, utförd på VTI, som ingår i Naturvårdsverkets regeringsuppdrag kring ladd- och tankinfrastruktur för arbetsmaskiner. Den beskriver övergripande det nuvarande läget inom ett antal olika branscher inom arbetsmaskinssektorn och har ett brett omfång vad gäller de tekniska lösningarna, det vill säga den inkluderar alla typer av elektrifiering, samt tar även upp vätgaslösningar. Delstudien baserar sig på litteraturstudier, information från nyhetskällor, och samtal med representanter för ett urval av relevanta aktörer.

Ett axplock av exempel på relevanta aktuella piloter i Sverige och utomlands presenteras, både numera avslutade och pågående sådana, där de elektrifierade maskinerna och deras laddningsinfrastruktur beskrivs. Vidare resoneras kring nyckelfaktorer, utmaningar, identifierade trender framåt samt kopplingar till andra relaterade sektorer och deras utveckling.

Nyckelord

Elektrifiering, elektrifierade arbetsmaskiner, laddningsinfrastruktur.

Abstract

This study carried out at VTI is a part of a government commission given to the Swedish Environmental Protection Agency regarding charging and refueling infrastructure for electrified working machines. The study describes the current status within a number of different industries within the working machine sector and has a wide scope in terms of the technical solutions involved, i.e. it includes all types of electrification, and also covers hydrogen solutions. The study is based on literature review, information from news sources, and conversations with representatives of a selection of relevant actors.

A list of examples of interesting electrification pilots in Sweden and abroad are briefly presented, both completed and ongoing ones, where the electrified machines and their charging infrastructure are described. Furthermore, factors of importance and main challenges are discussed and related to identified future trends and connections to other related sectors and their electrification development.

Keywords

Electrification, electrified working machines, charging infrastructure.

Innehållsförteckning

Publikationsuppgifter – Publication Information **5**

Kort sammanfattning **6**

Abstract **7**

Sammanfattning **10**

Summary **12**

Förord **14**

1. Om uppdraget **15**

1.1. Omfång 15
1.2. Metod 15

2. Elektrifierade arbetsmaskiner idag – branscher och tekniker **17**

2.1. Bakgrund – varför elektrifiera samt vilka svårigheter finns 17
2.2. Status idag – några tekniker 18
2.2.1. Direktdrift 18
2.2.2. Långsam och snabb-laddning 18
2.2.3. Laddning i kombination med mobila energilager 19
2.2.4. Batteribyte 19
2.2.5. Dynamisk laddning och elvägar 20
2.2.6. Vätgas via bränslecell eller i förbränningsmotor 20
2.3. Branscher - elektrifieringsandel idag och utmaningar 20
2.3.1. Gruvindustrin 21
2.3.2. Bygg- och anläggningsmaskiner (gula maskiner) 21
2.3.3. Skogsbruk- och jordbruksbranscherna 22
2.3.4. Övriga branscher 23
2.3.5. Exempel på elarbetsmaskiner som finns idag – både designade och konverterade 23
2.3.6. Exempel på mobila energilager och elkraftanläggningar 25

3. Trender och utmaningar **27**

3.1. Fler aktörer och ökad komplexitetsgrad 27
3.2. Teknikutveckling, automatisering och digitalisering 27
3.3. Regelverk 27
3.3.1. Regelverk kring elektrifierade fordon och transport av batterier 27
3.3.2. Kopplingar till vägsektorns utveckling via AFIR 28
3.3.3. Regelverk kring registrering av arbetsmaskiner 28
3.4. Nya typer av elavtal – temporära samt tjänst-inriktade 28
3.5. Avsaknad av oberoende och validerade kostnadsberäkningsmodeller 29

4. Axplock av utvalda piloter och exempel i Sverige **30**

4.1. Slakthusområdet 30
4.2. Förskolan Ottfjället 30
4.3. Electric Worksite 30
4.4. Elektrifiering av tätorternas masshantering samt elektrifierad bandvagn 31
4.5. Kvarteret Persikan 32
4.6. Electric Farm 1 & 2 32
4.7. Elektrifierade gruvmaskiner 32
4.8. Elvägspiloter i gruvor 33
4.9. Skogspilot och Jordbrukspilot med modulärt batteribytessystem 33

4.10. Elektrifierad skogsgallring med drönare 34
4.11. Vätgasexempel 34
5. Exempel utomlands 36
5.1. Kina 36
5.2. Norge 36
5.3. Nederländerna 37
5.4. Övriga länder – USA, Sydkorea, m.m. 37
6. Slutsatser och insikter gällande främjande av elektrifieringen 38
6.1. Kort summering om branschernas status och utmaningar 38
6.2. Analys och diskussion av faktorer som påverkar 39
6.3. De viktigaste insikterna 41
Referenser 42

Sammanfattning

Rapporten presenterar en delstudie, utförd på VTI, som ingår i Naturvårdsverkets regeringsuppdrag kring tank- och laddningsinfrastruktur för elektrifierade arbetsmaskiner.

Målet för delstudien har varit att övergripande beskriva det nuvarande läget inom olika branscher med brett omfång vad gäller teknikval, det vill säga inklusive alla typer av elektrifiering, och även vätgaslösningar, samt att ge exempel på relevanta aktuella fall i Sverige och utomlands. De presenterade exemplen på maskiner och pilotstudier är inte heltäckande utan illustrerar utvecklingen och dess bredd. Delstudien innehåller även en diskussion kring utmaningar och identifierade trender framåt. Metod för delstudien har varit litteraturstudier, information från nyhetskällor och samtal med representanter för ett urval av relevanta aktörer.

Branscherna som är bäst representerade i det axplock av exempel som förts fram är jord- och skogsbruk, byggbranschen, samt gruvindustrin. Möjliga typer av infrastruktur för energiförsörjning som tas upp är direktdrift, olika typer av kabelladdning och landningsplatser, batteribyteslösningar, elvägar, laddning med energilager (powerbanks), och vätgaslösningar, både med bränsleceller och direkt förbränning.

Delstudien finner att det sker en allt snabbare elektrifiering av tyngre och mer kraftfulla arbetsmaskiner och fordon såsom exempelvis grävmaskiner och hjullastare, dock från en låg nivå av elektrifieringsgrad. Mycket aktivitet pågår och det finns många intressanta exempel att studera, dock befinner sig en del av lösningarna fortfarande i startfasen. Gruvindustrin är den bransch som generellt kan anses ha kommit längst idag, men lyckade exempel finns i flera branscher. En transformation mot elektrifiering av byggnadsbranschen är pågående vilket illustreras i flertalet beskrivna aktiva projekt med elektrifierade arbetsmaskiner i ett avancerat stadium. Jordbruks- och skogsbranschen möter större utmaningar, även om lyckade piloter finns att hitta även där.

Sett ur tekniskt perspektiv, är lösningarna som är starkast idag till övervägande del olika batterilösningar, men man är beredd på att andra typer av lösningar kan ta fart längre fram. I flera fall finns batterilösningar redan på marknaden i Sverige, men detta ser olika ut i olika branscher. Som kontrast befinner sig exempelvis vätgaslösningar i en tidig prototypfas. En trend identifieras där elektrifierade arbetsmaskiner erbjuds tillsammans med erbjudande av energilager som utvecklas som stöd.

Det är svårt att få en klar uppfattning exakt hur stor andel i procent av arbetsmaskinerna har elektrifierats i olika branscher, samt uppskatta hur mycket som drivits av intrinsiska respektive externa faktorer via satsningar utifrån. Det är dock tydligt att branscherna har väldigt olika förutsättningar för att uppnå en hög elektrifiering på kort sikt. En nyckelfaktor är just infrastrukturens utformning och möjlighet till att stödja elektrifieringslösningar i konkreta fall. Denna kan vara en flaskhals, men det finns även exempel, framför allt för piloter i byggsammanhang, där laddinfrastrukturen har varit lättare att ordna än man trodde initialt, samt indikationer på att det ibland kan finnas möjligheter att lösa problemen om man angriper frågan på nya sätt. Utformningen av infrastrukturen är nyckelförutsättningen för vilken optimering av logistik är möjlig.

Det finns flera aktörer som driver på utvecklingen från olika håll. Dels drivs detta via producenter som erbjuder nya elektrifierade produkter. Exempelvis är svenska Volvo CE en ledande aktör i byggnadsbranschen och Sandvik och Epiroc i gruvindustri-sammanhang, men det har dykt upp även nya aktörer som erbjuder ombyggnationer av befintliga fossilalternativ och kompletterar producenternas roll. Dessutom finns aktörer som påverkar genom att erbjuda energilager, samt elbolag som kan erbjuda nya typer av kontrakt. Vidare drivs vissa av de beskrivna elektrifierings exemplen i denna studie via beställare med politiska motiv.

Synergier finns med elektrifieringstransformationen i andra sektorer, exempelvis vad gäller trender och standarder, men man kan redan se tydliga skillnader. Exempelvis finns batteribyte som en något mer etablerad lösning på arbetsmaskinsmarknaden än hos bil- och lastbilsbranscherna i Sverige. Även

andra lösningar som exempelvis vätgasbaserade energilösningar finns som prototyper men det är svårt att bedöma hur den utvecklingen kommer att ske.

Utöver teknikfrågan, som ofta inte är det största hindret, nämns bland de viktigaste insikterna ett antal nyckelfaktorer. Dessa nyckelfaktorer inkluderar tillgång till energi och effekt på specifika platser, vilka aktörer som driver transformationen och hur den kopplar till övriga sektorer såsom elektrifiering av transportsektorn och hanteringen av en ökad komplexitet som följer med elektrifieringen. Vidare efterfrågas kunskap och ökad transparens kring uppskattning av aktuella behov och kostnader (exempelvis data över arbetscykler och elbehov), aktuella styrmedel (exempelvis möjlig justering av effektnivåer som krävs för att få stöd) samt vilka regelverk som gäller för hantering av maskiner och laddinfrastruktur, inklusive frakt av batterier. Infrastrukturen formar och kan begränsa logistik-möjligheterna och hur en uppskalning kan se ut men öppnar också för möjligheter att optimera belastning på elnätet och använda sig även av positiva effekter av exempelvis batterilager.

Summary

This study carried out at VTI is part of a government assignment to the Environmental Protection Agency regarding charging infrastructure for electrified working machines. The aim of the study has been to describe the current situation within various industries with a wide range of technology choices, i.e. including all types of electrification, and also hydrogen solutions, as well as to give examples of relevant current pilots in Sweden and abroad. The presented examples of machines and pilots provide a non-exclusive list aiming to paint a picture of the ongoing development. The study also presents a discussion of challenges and identified trends going forward. The method has been literature review, information from news sources and conversations with representatives of a selection of relevant actors.

Most examples covered are within the industries agriculture and forestry, construction and roads, and the mining industry. Possible types of infrastructure for the energy supply that are addressed in the study are direct electrification, various types of cable charging and landing sites, battery swapping solutions, electric roads, charging with energy storage (powerbanks), and hydrogen solutions, both with fuel cell and direct combustion.

The study finds that there is ongoing an accelerating electrification towards heavier and more powerful working machines and vehicles such as excavators and wheel loaders, although from a low initial level of electrification. There is a high number of ongoing activities with many interesting examples to study, however, some of the solutions are still in the start-up phase. The mining industry is the industry that can generally be considered to have come the farthest today, but successful examples can be found in several industries. A transformation towards electrification of the construction industry is underway, which is illustrated in the numerous described active projects with electrified working machines at an advanced stage. The agricultural and forestry industry faces greater challenges, although several successful pilots can be found there as well.

Seen from a technical point of view, the solutions that are strongest today are predominantly of the type having batteries, but the industries are open to other types of solutions gaining momentum in the future. In several cases, battery solutions are already on the market in Sweden, but this looks different in the different industries. In contrast, for example, hydrogen solutions are in an earlier prototype phase. A trend is identified where electrified working machines are offered together with an offer of energy storage being developed as support.

It is difficult to get a clear picture of the current percentages of what share electrification has reached in various industries, as well as estimate how much of this development is driven by intrinsic factors or influenced by outside investments. It is, however, clear that the industries have very different conditions for achieving high levels of electrification in the short term. A key factor is exact implementation of the infrastructure and the possibility to support the different electrification solutions in concrete cases. This can be a bottleneck, but there are also examples, especially for pilots in the construction context, where the infrastructure connection to the grid has been easier to arrange than initially thought, as well as indications that there may sometimes be opportunities to solve the problems if the issue is approached in new ways. The design of the infrastructure is the key prerequisite for which optimization of logistics is possible.

There are several actors driving the development from different directions. In part, this is driven via producers who offer new electrified products. For example, Swedish companies Volvo CE is a leading player in construction and Sandvik and Epiroc in the mining industry context, but there is also the emergence of a number of new players that offer conversions of existing fossil alternatives that complement the role of the producers. On the one hand, there are synergies with energy players, for example electricity companies come in as players that offer energy storage or different types of contracts. Furthermore, some of the examples described in this study are run via commissions made with political motives.

Synergies exist with the electrification transformation in other sectors, for example in terms of trends and standards, but there are also clear differences already. For example, battery swapping is a somewhat more established solution in the working machine market than in the car and truck industry. Other solutions such as hydrogen-based ones are also available as prototypes, but it is difficult to say how that will develop.

Among the most important insights from the study, several key factors are mentioned besides the technology issue, which is often not the biggest obstacle. These key factors include access to energy and power in specific locations, who is initiating the transformation and how the working machine sector links to other sectors such as the electrification of the transport sector, as well as managing the increased complexity that comes with electrification. Furthermore, knowledge and increased transparency are needed regarding the estimation of current energy needs and costs (for example, reliable data on work cycles and energy needs for the machines), current government support tools (for example, possible adjustment of electrical power levels required to receive monetary aid) and which regulations apply to handling machines and charging infrastructure, including transport of batteries. The chosen infrastructure for each case will shape the logistics possibilities and what a scale-up can look like, but it also opens up the possibility of optimizing the load on the electricity grid and the possibility of offering supporting effects, i.e. via battery storage.

Förord

VTI har bistått Naturvårdsverket i deras regeringsuppdrag kring elektrifierade arbetsmaskiner och deras laddinfrastruktur genom att i denna delstudie beskriva övergripande nuvarande läge, relevanta teknologier, lyft fram aktuella exempel i Sverige och utomlands och diskuterat kring utmaningar och trender framåt. Kontaktpersoner hos flera aktörer, speciellt i samband med pågående pilotprojekt, har ställt upp via mejl och samtal för att ge extra information och insikter. Tack för samarbetet!

Göteborg, augusti, 2024

Svetla Käck
Projektledare

Granskare/Examiner

Magnus Lindgren, Trafikverket

De slutsatser och rekommendationer som uttrycks är författarens/författarnas egna och speglar inte nödvändigtvis myndigheten VTI:s uppfattning. /The conclusions and recommendations in the report are those of the author(s) and do not necessarily reflect the views of VTI as a government agency.

Publikationen godkänd för publicering/Publication approved for publication

Magnus Eek, VTI

1. Om uppdraget

Denna rapport presenterar ett arbete utfört på VTI huvudsakligen under maj-juni 2024 i form av en delstudie som utgör underlag till ett regeringsuppdrag som Naturvårdsverket har fått kring laddningsinfrastruktur för elektrifierade arbetsmaskiner. Regeringsuppdraget till Naturvårdsverket formuleras: *Åtgärder för att främja ladd- och tankinfrastruktur för arbetsmaskiner - Naturvårdsverket ska analysera och vid behov föreslå åtgärder för att främja ladd- och tankinfrastruktur för arbetsmaskiner samt underlätta förutsättningarna för byte och transport av batterier till arbetsmaskiner*.

Fokus för VTI:s leverans till Naturvårdsverket och denna rapport är att beskriva på ett översiktligt sätt dagsläget för elektrifiering och vätgasdrift av arbetsmaskiner i Sverige:

- Vilka maskiner finns på marknaden och till vad används de
- Vilka pilotprojekt pågår eller är på gång
- Behov och förutsättningar för direkt eldrift, laddning, batteribyte och infrastruktur för vätgas
- Utmaningar för att få infrastruktur för fossilfri energiförsörjning av arbetsmaskiner

Samt beskrivning av nuläget i andra länder - vilka tekniker och energibärare används och hur ser trender ut, vilka driftkrafter finns, och hur dessa kan påverka utvecklingen av infrastrukturen i Sverige.

1.1. Omfång

Omfånget för studien har varit relativt brett då den inriktar sig på eldrivna mobila arbetsmaskiner och deras laddinfrastruktur i alla branscher och sektorer, och med alla typer av elektrifiering. Exempel på branscher där arbetsmaskiner kan förekomma och som diskuteras mer ingående i denna studie är jord- och skogsbruk, bygg- och anläggning, vägunderhåll samt gruvindustrin. Arbetsmaskiner generellt förekommer även inom industrin, maritimt, bostäder och lokaler, hamnar och flygplatser etc. Elektrifiering av dessa är ibland också aktuellt, men har inte studerats explicit här.
Ursprungligen fanns en avgränsning av uppdragets omfång till enbart så kallade ”miljöarbetsmaskiner” som är eldrivna med nettoeffekt på minst 15 kW. Denna har dock under tiden för studien mildrats. Målet med begräsningen har varit att sikta in sig på större arbetsmaskiner såsom traktorer, kranar, grävmaskiner, borrmaskiner.

Flera typer av infrastruktur för energiförsörjning ingår i uppdragets omfång. Alla elektrifieringstyper så som direktdrift, olika typer av kabelladdning och landningsplatser, batteribyteslösningar, elvägar, laddning med energilager (powerbanks) inkluderas, och även vätgaslösningar, både med bränslecell och direkt förbränning. Exkluderade är bland annat flytande fossila eller bio-bränslen såsom metanol, HVO, andra elektrobränslen, etc. Det är underförstått att utvecklingen kring dessa kan påverka elektrifieringsgraden, till exempel kan andra bränslens relativa pris påverka konkurrensvillkoren och då indirekt öka eller minska elektrifieringspotentialen i olika situationer.

1.2. Metod

Metoderna för studien har varit litteraturstudier, deltagande i två av naturvårdsverkets dialoger med näringsliv och myndigheter, samt information från nyhetskällor. Där det har varit möjligt har även några informella samtal med representanter för ett urval av relevanta aktörer kontaktats och vissa har

kunnat dela med sig av ytterligare information och insikter[1]. Som det kommer att tas upp i senare delar av rapporten, finns det idag ett något mindre antal publikationer i detta ämne jämfört med antalet skrivna källor för relaterade områden såsom elektrifieringen av bilar och lastbilar. Exempelvis saknas ibland bra källunderlag kring vissa pilotstudier, både sådana som fortfarande pågår och sådana som redan är avslutade. Med tanke på att den större kontexten till detta uppdrag är att främja elektrifieringen för elektrifierade arbetsmaskiner har dock även en del information som härrör från samtal med aktörer och bedömts som relevant fångats in och inkluderats i rapporten med hänvisning till personlig kommunikation.

[1] Personer från följande aktörer har under informella samtal kunnat dela med sig av information och insikter kring elektrifierade arbetsmaskiners nuläge: Eon, Volvo CE, Vattenfall, Epiroc, Rise, Stockholms stad, Energimyndigheten, Trafikverket.

2. Elektrifierade arbetsmaskiner idag – branscher och tekniker

2.1. Bakgrund – varför elektrifiera samt vilka svårigheter finns

Arbetsmaskiner innefattar några av de största och kraftfulla maskinerna. Elektrifiering av dessa kan ge minskade utsläpp men har även andra stora fördelar, såsom exempelvis tystare arbetsplatser, minskade luftföroreningar och energieffektivisering, och kan därför vara önskvärt av flera anledningar. Trots en ökning av antalet elektrifierade maskiner har dock hittills genomslaget varit relativt litet vad gäller elektrifieringsgraden av arbetsmaskiner totalt, även på de mer progressiva marknaderna, om man jämför med läget för bilar och lastbilar. En av de möjliga anledningarna till detta är att för lätta och tunga fordon finns kraftfulla styrmedel, både på nationell nivå och via EU-nivå, som ökar incitamenten för tillverkare att sälja nollutsläppsfordon, vilket i nuläget inte finns för arbetsmaskiner. Denna delstudie är ämnad att användas som bakgrund och underlag för att bättre förstå status och hinder och eventuellt kunna främja elektrifieringen. Som utgångspunkt beskrivs kortfattat de olika branscherna samt de olika teknikerna som finns till förfogande.

Diskussion och beräkningar kring hur utsläpp kan påverkas av en elektrifiering av arbetsmaskinerna ingår inte i detta uppdrag. Det kan dock nämnas att det finns ett stort antal arbetsmaskiner i Sverige med varierande arbetsområden och att arbetsmaskiner stod för 7% av de totala svenska nationella koldioxidutsläppen för år 2020, och minskade till 6% under 2023, en siffra jämförbar med uppskattningen för bidraget av tunga lastbilar (Trafikanalys, 2023) (Naturvårdsverket, 2024). Denna siffra har en hög osäkerhet bland annat pga att gruppen är mycket heterogen och att det finns svårigheter med insamlade underlagsdata för arbetsmaskiner eftersom exempelvis drifttider och verkningsgrader inte samlas in. Ytterligare försvårande omständighet, som framkommit under samtal med aktörer inom studien, är att man ibland kan hämta bränsle till de arbetsmaskiner vid pump på bensinmackar via andra fordon vilket försvårar en korrekt allokering av bränsleförbrukning mellan de olika sektorerna.

Nedan anges en kort summering av några allmänna karakteristiker och insikter gällande arbetsmaskiner som kan leda till utmaningar kring elektrifieringen av dessa:

- Tyngre arbetsmaskiner behöver i regel mycket kraft och kan vara i drift under långa tider. De kan behöva arbeta över stora geografiska områden över en längre tid. Samtidigt har vissa av dem en låg hastighet för förflyttning och ibland inte kan förflytta sig långt under samma dag, vilket kräver flexibilitet hos lösningar för infrastrukturen. Inom vissa branscher behövs exempelvis ofta tillfällig laddinfrastruktur. Väldigt stora skillnader finns i de olika branscherna kring de exakta förutsättningarna.
- Marknaden för arbetsmaskiner är betydligt mindre än den för lastbilar, som i sin tur är mindre än den för personbilar. Lägre fordonsvolymer och fler olika typer av arbetsmaskiner, i jämförelse med det som gäller för bil- och lastbilsflottor, kan korrelera till hur mycket tillverkarna kan skräddarsy lösningar till specifika förhållanden vid elektrifiering. Dessutom agerar tillverkarna oftast på en global marknad. Detta innebär att den elektrifieringslösning som vore bäst lokalt i Sverige kanske inte får lika stort genomslag globalt och därför inte utvecklas. Priset för arbetsmaskiner (särskilt stora) är generellt högt och elektrifierade arbetsmaskiner och laddinfrastruktur är mycket dyrare än det fossildrivna alternativet, vilket påverkar marknaden.
- Just nu är det övergripande systemet i vilket arbetsmaskinerna ingår både designad och optimerat för fossildrift. Utgångspunkt är därför ofta att man önskar samma prestanda och operationstider som idag finns för de fossildrivna alternativen av maskinerna, och gärna till maximalt samma kostnad som de fossila alternativen då de flesta branscherna har små marginaler. Som det kommer diskuteras längre fram kan man eventuellt via ändrat systemtänk och nya sätt att operera ändra dessa antaganden och förutsättningar. Dessutom bör man ta

hänsyn till att kostnadsbilden är komplex och består att flera komponenter. Till exempel kan eldrift i en del fall ge billigare drift i det långa loppet vilket uppväger högre inköpskostnad för maskinen, men detta är samtidigt avhängigt på att kostnaden för laddinfrastrukturen kan fördelas på ett fördelaktigt sätt.

- I likhet med läget för elektrifiering av andra fordon kan det för arbetsmaskiner behövas tillsättning av nya roller. Dessa kan antigen fyllas via uppkomst av nya aktörer som äger delar av infrastrukturen som krävs för laddning, eller av befintliga aktörer som träder in i rollen som laddoperatör. För arbetsmaskiner varierar det beroende på bransch och omständigheter hur tydliga rollerna är idag och vem som kan ansvara för de nya delarna av infrastruktur som kan behövas. Exempel på den typen av nya aktörer skulle kunna vara uthyrare av batterilager eller batteribytestationsoperatörer eller aktörer som säljer tjänster på energitjänstemarknaden.

2.2. Status idag – några tekniker

Nedan listas en kort beskrivning av tillgängliga elektrifieringstekniker och elektrifieringslösningar samt ett övergripande förklaring över deras potential och utmaningar. Observera att varje lösning har för- och nackdelar och att vissa teknologier har nått högre mognadsgrad än andra. Vidare är det viktigt att betona att man fortfarande håller på att aktivt utveckla nya tekniker, exempelvis pågår aktivt forskning vad gäller ny batterikemi som påverkar hur man skulle kunna använda de elektrifierade maskinerna. Nya forskningstrender kommer inte att diskuteras ingående i denna delstudie, men sådana skulle förstås påverka landskapet.

Följande typer av faktorer identifierar vi är av huvudintresse när olika lösningar ska utvärderas mot varandra: möjlighet till att koppla sig mot elnätet och vilken eleffekt som krävs/erbjuds; markåtgång för infrastrukturen skiljer sig för de olika lösningarna vilket även påverkar logistiken på platsen; resursfrågor såsom hur många och hur stora batterier som krävs; samt affärsmodeller och tillkommande kostnader för de olika lösningarna. Detta utvecklas vidare i Kapitel 6.

2.2.1. Direktdrift

Ett tekniskt enkelt sätt att elektrifiera vore att välja direktdrift och ansluta arbetsmaskinen via kabel till det befintliga elnätet. Detta kräver dock att det finns en anslutningspunkt med tillräcklig kapacitet i närheten av platsen där maskinen arbetar vilket inte alltid är möjligt. Vid direktdrift behövs inget batteri men i gengäld belastas nätet i real tid. Hantering av kabeln kan vara en nackdel och minska flexibiliteten vilket gör lösningen lämplig för en begränsad typ av användningsfall.

2.2.2. Långsam och snabb-laddning

I de fallen det elektrifierade fordonet har ett batteri behöver det tillgång till en laddstation. Beroende på typ kan denna erbjuda laddning med olika kapacitet och laddning via konduktiv eller induktiv metod. Vanligast är kabel-laddning, där man AC-laddar långsamt exempelvis under natten när fordonen ej är i drift. Långsam laddning är nämligen mer skonsamt mot batteriet och elnätet men tar längre tid. Snabbladdning kortar ladd-tiderna men sliter mer på batterierna samt belastar elnätet i högre grad, samt kräver oftast DC laddning.

Det finns olika laddstandarder för laddning av vägfordon idag, och redan idag finns arbetsmaskiner som använder standarder för vägfordon. Troligtvis kommer denna utveckling fortsätta i framtiden. Synergieffekter skulle innebära att man exempelvis skulle kunna ladda arbetsmaskiner på en laddstation framtagen för lastbilar, privat eller även publik. Exempel på standarder är CCS (Combined Charging System, certifierad laddningsprotokoll, där exempelvis CCS typ 2 konnektorn är standard i Europa och Asien sedan 2018 och erbjuder effekt typiskt upp till 350 kW och 500 A ström) samt MCS (Megawatt Charging System) som ännu inte är en färdigutvecklad standard. Den senare utvecklas för

större elfordon och kommer erbjuda högre effekter (maxeffekt 3.75 MW för max 1250 Volt och 3000 Ampere DC). Vissa tillverkare utvecklar även egna laddstationer.

Vid denna typ av laddning belastas nätet med samma effekt som man laddar med, och infrastruktur för (snabb) laddning kan därför vara problematisk i vissa områden. En lösning, för att minska belastningen mot elnätet är att kombinera laddstationen med ett energilager.

2.2.3. Laddning i kombination med mobila energilager

Om elektrisk anslutning saknas på en plats och blir för dyr att uppföra, kan ett flyttbart energilager vara en lösning för att möjliggöra laddning på platsen. Det innebär vanligtvis att ett batteribaserat energilager laddas på en annan plats och sedan flyttas till platsen där laddbehovet finns.

Energilager kan också vara en lösning då den tillgängliga effekten i laddpunkten inte är tillräcklig, för snabbladdning, alternativt att driva en maskin med stort effektbehov. Ett energilager möjliggör i det fallet en högre effekt genom att laddas upp långsamt (över dygnet 24 timmar, många aktiviteter står stilla utanför arbetstid) och möjliggör en snabb urladdning då behov på hög effekt finns.

Ett energilager är dock förknippad med en extrakostnad. Därför blir kostnadskalkylen en avvägning mellan vad batterilagret kostar och vad det skulle kosta att installera högre effekt på den givna platsen. Dock skall här nämnas att tid för att få tillgång till hög effekt på en plats kan vara lång och då kan inskaffade av batterilager var en snabbare lösning. Det kan vara en lämplig lösning då effektbehovet är temporärt, det vill säga existerar bara under en begränsad tid (till exempel under ett pågående bygge).

En annan aspekt av att använda energilager är möjligheten till besparingar genom smart laddning (begränsning av effektbehov från nätet, endast ladda då elpriset är lågt) eller en andra intäkter (genom försäljning av andra tjänster som frekvensreglering av elnätet eller att handla med el). Dessa aspekter kan påverka totalekonomin för en investering i ett energilager. Den totala ekonomiska kalkylen bör väga samman samtliga ovan nämnda aspekter.

2.2.4. Batteribyte

Batteribytesteknologi erbjuder en möjlighet att på några minuter byta ut ett tomt fordonsbatteri till ett fulladdat sådant. Detta kräver att man har designat batteriet för att kunna tas ut samt har tillgång till en batteribytesstation med ett antal batteriplatser. Vanligtvis sker bytet på ett automatiserat sätt men det går även att ha manuellt övervakade lösningar. Efter bytet laddas de urladdade batterierna via batteribytesstationens egen anslutning till nätet.

Denna lösning har ett antal fördelar som lämpar sig väl i sammanhanget och som har gjort att den är förhållandevis välrepresenterat i arbetsmaskinsektorn globalt, dock ej i Sverige. Batteribytesstationerna kan teoretiskt sett användas också för nättjänster likt andra energilager[2].

Fördelar med batteribyte är att det går snabbt och kräver ett lägre markanspråk än vid vanlig parallell laddning av flera fordon, vilket underlättar logistiken på plats. Oftast minskar efterfrågan på snabbladdning, dvs batterier som laddar kan sannolikt planeras att laddas med långsam laddning vilket minska påverkan på elnätet. Vidare kan en särkoppling av batteri och fordon ge flera positiva effekter som lägre fordonskostnad om man köper fordonet men enbart hyr batteriet, kombinerat med en potential att välja batteristorlek enligt behov.

Ytterligare fördel med denna tekniklösning är att man kan ta ut batterierna och använda i andra maskiner ifall den elektrifierade arbetsmaskinen är säsongsbunden och står still under längre perioder, vilket är fallet med vissa typer av jordbruksmaskiner.

[2] Batteribytestationer för bilar används redan för att leverera frekvenstjänster i andra länder och möjligheten lanseras även i Sverige under hösten (Nio, 2024).

Nackdelar med teknologin är krav på standardiseringar av *Battery management systems* (BMS) och eventuellt större resursbehov beroende på implementering (då det finns en avvägning mellan möjligheten till flexibilitet mot elnätet och mängden batterier i systemet). Slutligen krävs det antigen en ny aktör som ansvarar för batteribytesstationen eller att en befintlig aktör tar den rollen.

2.2.5. Dynamisk laddning och elvägar

Elvägar är en elektrifieringslösning som minskar behovet av ett stort batteri i själva fordonet, men kräver infrastruktur som är utbyggd på vägen som fordonet framförs på. Det ger en annan typ av infrastrukturkostnad jämfört med vanliga laddare. Den exakta implementationen av elvägslösning kan variera. Olika lösningar, som att använda sig av konduktiv laddning med skena eller pantograf, eller även induktion har utvecklats. Denna lösning ger en hög energieffektivitet, speciellt vid mindre batteristorlekar. Dock belastas elnätet i realtid i motsvarighet till fordonets aktuella förbrukning. Teoretiskt sett kan man även kombinera elvägar med batterilager, samt alternera med att bygga vägsträckor med och utan elväg och därmed laborera något med hur belastningen på elnätet utformas och hur mycket batterier i fordonen som krävs. Typiskt vill man dimensionera elvägen för att både klara av framdrift och laddning av batteriet.

Teoretiskt sett skulle dynamisk laddning och elvägar kunna vara ett alternativ även för vissa typer av arbetsmaskiner om dessa arbetar i närheten av befintlig elväg i tätort eller i gruvsammanhang, se även pilotexempel i kapitel 4.8.

2.2.6. Vätgas via bränslecell eller i förbränningsmotor

Vätgas har flera fördelar som bränsle, samt flera nackdelar, och är generellt idag något mindre mogen teknik för arbetsmaskiner än vanlig elektrifiering då det finns återstående tekniska utmaningar kring produktion, lagring och distribution, samt utmaningar avseende totalverkningsgrad och kostnad.

I allmänhet är den största fördelen med vätgas att den går snabbt och smidigt att tanka och att den har hög energitäthet, vilket ger potential för längre drifttider. Det går mycket snabbare att tanka vätgas jämfört med att ladda ett batteri och är jämförbart med tanktiderna för ett fossilt alternativ. Vidare får man lägre vikt på maskinen eller fordonet, då man slipper batteripack som oftast är tungt.

Vätgasen kan kombineras med så kallade bränsleceller men det går även att förbränna direkt i förbränningsmotor. För bränsleceller är lösningen effektiv på fordonsnivå och koldioxidfri när vätgasen producerats hållbart eftersom den enda biprodukten då blir vatten. Dock ingår det också komponenter i bränsleceller som placerar lösningen i samma typ av diskussioner gällande sällsynta jordartsmetaller i batterier. Vid förbränning i ICE (förbränningsmotor) får man fördelar att man kan använda liknande motorer som för fossila drivmedel, å andra sidan löser man via denna typ av energianvändning enbart koldioxidutsläppen men producerar fortfarande NOx, dvs vätgas-ICE är inte egentligen ”zero tail pipe emission” (dock tillåter EUs definition av nollutsläppslastbilar även ICE med vätgas).

Vid produktion av vätgas från el, samt omvandling till el i bränslecell går mycket energi förlorad vilket gör att verkningsgraden blir betydligt lägre (1/3 eller mindre) i jämförelse med ett batterifordon och ännu mindre om vätgasen används i en förbränningsmotor.

Produktionen av vätgas behöver vara grön för att få de maximala fördelarna med detta bränsle. Detta har visat sig vara mer utmanande att uppnå än det motsvarande kravet att produktionen av el för de övriga laddnings alternativen ska vara grön.

2.3. Branscher - elektrifieringsandel idag och utmaningar

Väldigt olika förutsättningar och behov finns gällande elektrifieringen i olika branscher, samt huruvida det redan finns utbud av elektrifierade lösningar på marknaden och hur lätt det är att ha tillgång till elnätskoppling med den nödvändiga kapaciteten. Gemensamt är att tillfälliga nätkopplingar ofta krävs

i vissa branscher, och att elektrifieringen kan öka komplexitetsgraden på platsen, vilket driver behovet av flexibla lösningar.

Det pågår intensiv utveckling kring elektrifieringsmöjligheterna i olika branscher, speciellt där det är en öppen fråga huruvida man klarar sig med enbart nattladdning eller måste säkerställa att snabbladdning eller övrig kompletteringsladdning finns att tillgå under dagdrift. Som diskuterat tidigare, finns det olika typer av laddningsinfrastruktur och vissa lösningar kräver ibland energilager eller anpassad infrastruktur såsom batteribytesstationer.

En nyckelfråga är logistiken. Flera utmaningar handlar om hur man kan optimera sin arbetsmaskinflotta för att laddning ska ske när det behövs. Det är den frågan som också påverkas när man skalar upp en verksamhet från någon enstaka maskin till en större flotta som behöver laddas samtidigt.

Generellt är trenden tydlig om man tittar på tillverkares produktkataloger, och pekar mot att en ökad elektrifiering av tyngre och mer kraftfulla fordon som grävmaskiner och hjullastare sker, dock utgående ifrån en låg elektrifieringsnivå. Inga klara procentsatser för hela branscherna finns redovisade än så länge.

Ytterligare en aspekt är att affärsmodellerna kan skilja sig i olika branscher också för nollutsläppsarbetsmaskiner.

2.3.1. Gruvindustrin

Gruvindustrin är den bransch för arbetsmaskiner som har kommit längst med elektrifieringen idag. Detta är troligtvis korrelerat med att det är tydligare vilka aktörer som finns, beställare har något bättre marginaler, och att det finns flera starka incitament till elektrifiering. Exempelvis har man trots införandet av elektrifierade maskiner kunnat minska elbehovet vid elektrifiering eftersom man samtidigt kunnat spara på el till de enorma fläktarna som har behövts för att driva ut avgaser från de tidigare förbränningsmotordrivna maskinerna i de underjordiska utrymmena. Det som görs idag är elektrifiering av borr- eller andra maskiner och man har gjort detta via kabeldrift, batteribyte, samt har även drivit en elvägspilot, som kommer att beskrivas kort i kapitel 4.

En elektrifieringsutmaning specifikt för gruvindustrin är skillnaden mellan så kallade gröna och bruna fält (”green” vs ”brown fields”), dvs huruvida en ny gruva kan designas för eldrift från start eller om man måste anpassa sig till markåtgång och dylikt på en befintlig gruva. Detta kan påverka exempelvis huruvida det finns rent fysiskt plats för den infrastruktur som krävs.

2.3.2. Bygg- och anläggningsmaskiner (gula maskiner)

Näst på skalan i elektrifieringsandel ligger branschen för bygg- och anläggningsmaskiner, ibland kallade gula maskiner. Det finns flertalet mindre elektrifieringspiloter i denna bransch, varav några kommer diskuteras i kapitel 4. Det som kännetecknar branschen är att det finns flera elektrifierade alternativ och färdiga lösningar att köpa på marknaden, men att dessa varianter än så länge är dyrare än sina förbränningsmotordrivna motsvarigheter. Viktiga frågor i branschen är kostnader, transparens i hur man ska kunna räkna på den exakta innebörden av elektrifiering, komplexitetsgraden pga den nya logistiken som krävs, samt eltillgång på plats. I byggbranschen är det ofta underentreprenörer som äger maskinerna och de har små marginaler i anbud till huvudentreprenör, vilket kan vara ett hinder när det ska investeras i dyrare maskiner.

Tabell 1 presenterar en lista på några av största aktörerna internationellt, där tre av de största aktörerna är svenska.

Tabell 1. De främsta aktörerna inom byggnadsbranschen (”construction machines”), med ursprungsland och ungefärlig marknadsandel av det totala antalet sålda enheter (dvs ej enbart elektriska), källdata från (Tong, o.a., 2021).

Placering	Företag inom bygg (Construction Machines)	Land	Ungefärlig marknadsandel i % (2020)
1	Caterpillar	USA	16
2	Komatsu	Japan	12
3	John Deere	USA	6
4	XCMG	Kina	6
5	SANY	Kina	5
6	Volvo Construction Equipment	Sverige	5
7	Hitachi Construction Machinery	Japan	4
8	Liebherr	Tyskland	4
9	Doosan Infracore	Korea	3
10	Zoomlion	Kina	3
11	Sandvik Mining and Rock Technology	Sverige	3
12	JCB	UK	3
13	Terex	USA	2
14	Epiroc	Sverige	2

2.3.3. Skogsbruk- och jordbruksbranscherna

Den svåraste utmaningen och därmed de minst elektrifierade branscherna bland de nämnda är skogsbruks- och jordbruksbranscherna.

Till skillnad från andra branscher kan här en ökad vikt orsakad av elektrifieringslösning med ett större batteri vålla till problem, till exempel om markjorden packas för hårt på en åker, eller om det råder dåligt framkomlighet till platserna där man arbetar samt åker på vägar med dålig bärighet. Om man i stället väljer en annan elektrifieringslösning som strävar efter användandet av små och lätta batterier, måste man kompensera med täta och snabba batteribyten eller laddning och blir beroende av extra välutbyggd laddinfrastruktur. Detta samtidigt som maskinerna i just dessa branscher arbetar på de mest avlägsna platserna, och över stora geografiska områden framför allt vid skogsbruk. Därmed är säkerställandet av energitillgången en extra stor utmaning. Därför är det ett mindre antal elektrifieringsmaskiner som finns utvecklade för dessa branscher.

Vissa aktörer har inställningen att man hellre än att elektrifiera via batterier som har ovannämnda problem, bör använda förnybara flytande bränslen, och invänta på att vätgaslösningar och standarder kring dessa ska utvecklas. Alternativt avvaktar man den fortsatta utvecklingen på batterisidan.

Prototyper finns som visar att elektrifierade arbetsmaskiner med batterier inte behöver nödvändigtvis vara ”stora, tunga, dyra”, men de flesta är fortfarande på utvecklingsstadiet. Exempel kommer att presenteras i kapitel 4, som även nämner ett exempel på projekt som rör pilot i lantbruksmiljö med kartläggning av energibehovet.

En skillnad mellan jordbruks- och skogsbruks-branscherna är att för många lantbruk kommer det troligtvis vara möjligt att underlätta elektrifieringen genom att kombinera med att ha en egen elproduktion, och på det viset säkra både en bättre tillgång och ett lägre elpris, via batterier eller vätgas. Dessutom kan man i ett lantbruk även dra nytta av synergieffekter ifall man elektrifierar även övriga mindre maskiner på gården.

2.3.4. Övriga branscher

Arbetsmaskiner förekommer även i andra branscher, exempelvis arbetsmaskiner kopplade till diverse arbeten inom industrin, flygplatser, hamnar med mera, som ej täckts ovan. Dessa kommer ej att specifikt behandlas i denna delstudie. Majoriteten av deras huvudutmaningar förväntas efterlikna någon av motsvarigheten i de ovan beskrivna branscherna.

2.3.5. Exempel på elarbetsmaskiner som finns idag – både designade och konverterade

Volvo CE

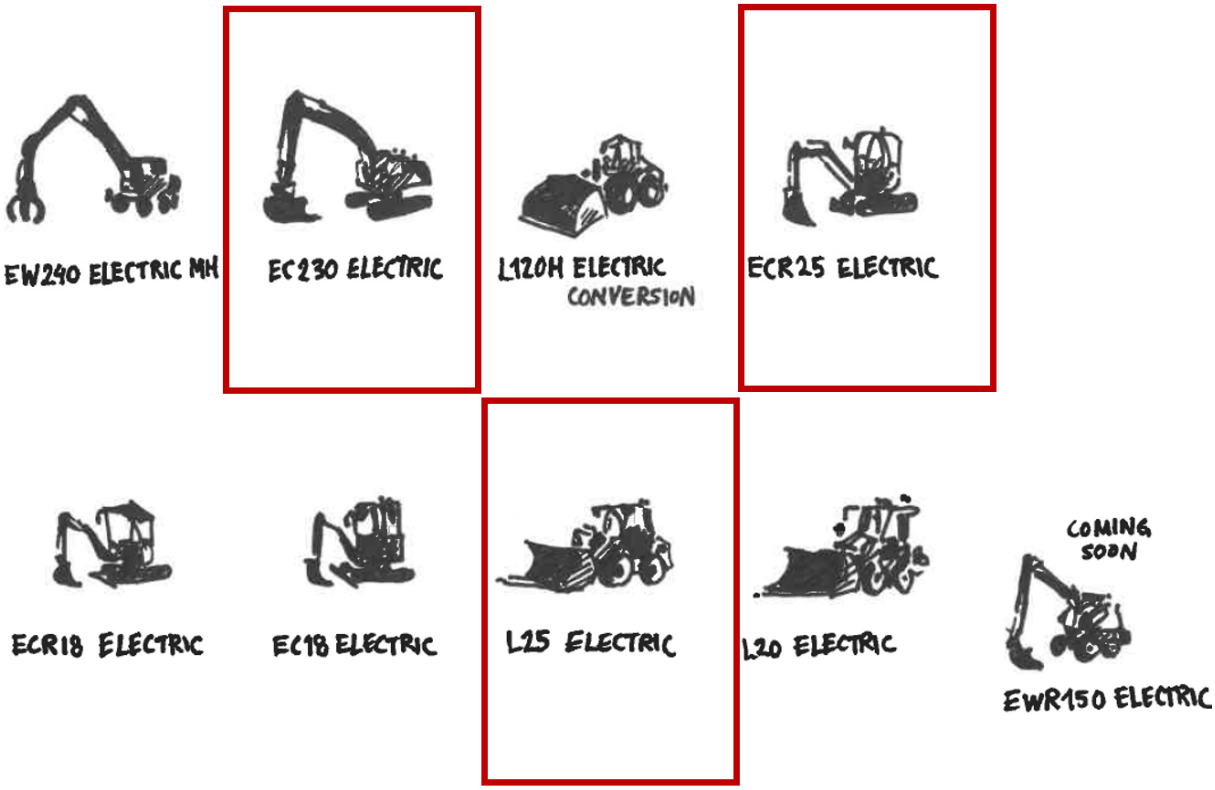
En av de ledande aktörerna på den elektrifierade ”gula” arbetsmaskin-marknaden är Volvo Construction Equipment (Volvo CE). Exempel på några elektrifierade arbetsmaskiner som erbjuds på marknaden idag kan ses i Figur 1 som presenterar Volvo CE:s nuvarande utbud. Rödmarkering pekar ut några av maskinerna som används i vissa pilotprojekt som beskrivs i Kapitel 4. Det är värt att notera att enbart en av de erbjudna maskinerna drivs via direktdrift, och alla övriga maskiner använder fast batteri som elektrifieringslösning, se maskindata i Tabell 2. Volvo CE:s Kina division har under 2023 vid en workshop nämnt egna koncept på maskiner som utvecklas för batteribyte[3]. Sådana maskiner finns dock ej tillgängliga att beställa idag och det är oklart när och om de kommer ut på marknaden.

Vissa av dessa maskiner har lanserats först utomlands, till exempel den 23-ton tunga EC230 som till en början släpptes i en förserie på den norska marknaden år 2023 och nu under 2024 används i svenska projekt. EC230 har den största batteriet, som är på 264 kWh.

Gällande antalet elektriska maskiner som faktiskt säljs och vilka marknader som just nu är starkast vad gäller inköp av elektrifierade maskiner är det svårt att hitta utförliga uppgifter. Volvo CE särredovisar i sin årsrapport antalet helelektriska kompakta maskiner[4] sålda, vilket ligger på 895 enheter för 2023 (en ökning på 50% jämfört med 2022), och motsvarar ca 6% av alla kompakta maskiner sålda som är 14 570. Det är dock de medelstora och stora maskinerna som dominerar i försäljningen med 45 494 av alla sålda maskiner på alla marknader som uppgår till 60 064 enheter (Volvo Group, 2024). Elektriska maskiner i stora och medelstoras klassen redovisas inte separat och är antagligen en liten andel. Om man försummar dessa skulle de elektriska maskinerna enbart komma upp till storleksordningen ca 1,5% av alla sålda maskiner (dvs kompakta, medelstora och stora). Detta är ej en helt representativ siffra då man egentligen bör jämföra maskiner av samma typer, men det ger en fingervisning om att den elektriska marknaden fortfarande är liten. Ytterligare en fingervisning är dock att Volvo CE har målet att 35% av sålda produkter ska vara elektriska år 2030 och att antalet erbjudna elektriska arbetsmaskinsmodeller har stadigt ökat sedan den första modellen erbjöds 2020.

[3] Presentation Volvo CE, Head of Technology China, webinar *Battery swapping in Commercial Vehicles* organiserad av IEA HEV TCP Task 48 Battery Swapping, 2023-06-28.

[4] Kompakta maskiner inkluderar Volvos ECR25, ECR18, EC18, L25, L20, se Figur 1 och Tabell 2. Däremot faller EC230 och L120H inom kategorien medelstora.



Figur 1. Exempel på elektrifierade arbetsmaskiner som finns på marknaden – här med Volvo CE som tillverkare. De rödmarkerade maskinerna är några som nämns i kapitel 4, Axplock av utvalda piloter. Maskindata för dessa anges i Tabell 2. (Bild: S. Käck skiss inspirerad av Volvo CE produkthemsida, "Eldrivna arbetsmaskiner för alla branscher" (Volvo CE, 2024), åtkomst i juni 2024.)

Tabell 2. Maskindata för Volvo CE eldrivna maskiner som visas i Figur 1, källa: (Volvo CE, 2024). Som det framgår är EW240 Electric MH den enda som använder direktdrift, alla andra är batteridrivna. Enbart en, L120H Electric Conversion, är en ombyggd maskin.

Maskinegenskaper	EW240 Electric MH	EC230 Electric	L120H Electric	ECR25 Electric	ECR18 Electric	EC18 Electric	L25 Electric	L20 Electric	(EWR150 Electric)
vikt [ton]	26.2	23-26.1	19-21.6	2.68-2.78	1.79-1.87	1.96	4.9-5.27	4.55	15.4-17.9
grävdjup [mm]	-	6730	-	2672-2965	2528-2727	2500-2700	-	-	-
skopvolym [m3]	-	-	2.5-9.5	-	-	-	0.9	0.8	0.73
batteri [kWh]	-	264	237	20	16	20	40	33	ej känt
max elmotoreffekt [kW]	90	160							

Andra exempel samt aktörer – Sandvik, Komatsu, E.C.E., Huddig, etc.

Fler exempel på arbetsmaskiner finns, med olika teknker och storlekar. Några som kan nämnas för att bredda bilden är Sandviks Battery Electric Underground Loader Toro LH518iB med batteribyte (utlovad 5 min batteribytestid där föraren ej lämnar fordonet, och kapacitet 18 ton och grävskopvolym 7 - 9.1 m^3) (Sandvik, 2024), samt Komatsu och Hondas gemensamt utvecklade mikroeskavator PC05E-1 med manuell swap Honda Mobile Power Pack på 1 kWh (Komatsu, 2023). Den sistnämnda säljs i Japan sedan 2022 och är ett exempel på en mycket mindre maskin med effekt på enbart 3.3 kW.

Huddig, ett svensk aktör, har satsat på att utveckla hybridlösningar. Exempelvis kan grävlastaren Huddig 1370T drivas både på diesel och på el i ca 2h med behållet vridmoment samt effekt på 81kW (Huddig, 2024).

Det finns även en del företag som har satsat på att konvertera fossillösningar. Ett exempel finns i Nerderländerna. Företaget E.C.E (står för Electric Construction Equipment) är en start-up sedan 2020 och en del av Staad. Man erbjuder exempelvis två olika konverterade Doosan excavators, modeller DX165W och DX300LC med Webesto modulära batterier, en batteribyteslösning (Webasto, 2024). Varje maskin har i detta fallet två utbytbara ”powerboxes” på 140kWh som den alternerar att använda och ladda (Staad, 2024). Staad kan även konvertera Volvo maskiner.

Epiroc

En av de ledande aktörerna för arbetsmaskiner för gruvdrift är Epiroc. De erbjuder både ovanjord och underjordiska el-lösningar (Epiroc, 2024). Flera av maskinerna erbjuds med batteribyte, där batteriet täcks av ett ”Battery as a service”-avtal, men det finns även maskiner med kabeldrift. Epirocs lösningar diskuteras vidare i kapitel 4.8.

Vätgasexempel – Volvo CE, JCB, Komatsu

Prototyper av vätgasdrivna arbetsmaskiner finns. Tre exempel är JCB som utvecklat en vätgasdriven grävmaskin med ICE motor, Komatsu bränslecell koncept på en mellanstorgrävare (Komatsu, 2024), samt Volvo CEs bränslecellsdumper ptototyp ”Electric Charlie” HX04, som diskuteras vidare i kapitel 4.11.

2.3.6. Exempel på mobila energilager och elkraftanläggningar

En tydlig trend som utkristaliseras är att tillverkare börjar erbjuda energilager-lösningar i direkt anslutning till försäljning av de elektrifierade maskinerna eller fordonen. Ett exempel är Volvo CEs som just nu erbjuder en så kallad Power Unit, PU40, en förhållandevis liten och smidig[5] energilagringsenhet på 40 kWh för mobil eller stationär användning (Volvo CE, 2024b). När detta skrivs är det klart att det kommer en större energilager i utbudet under närmaste månaderna, PU500 med 500kWh, och så småningom även en med 1000 kWh. Tabell 3 visar exempel på laddningstider för några arbetsmaskiner och att laddning via mobil lagringsenhet kan vara jämförbart med laddning via laddstation.

Trenden att erbjuda energilager lösningar finns även på lastbilsidan, tex går fler lastbils tillverkare mot att sälja laddning, t ex Scania startar nytt bolag Erinion för att sälja laddning i stor skala till åkerier, etc (Scania, 2024); samt Volvo Group som har skapat Volvo Energy 2020 med fokus på batterienergilager. Även elnätsbolag blir mer aktiva i utvecklingen.[6] Exempelvis håller Vattenfall och Northvolt på att utveckla Voltpack Mobile System som ska leverera upp till 225 kW effekt med en skalbar emergikapacitet från 255 kWh till 1275 kWh och fem fristående batterienheter kopplade parallellt (Vattenfall, 2024a). Det är en lösning där ägaren av lager blir Vattenfall via så-kallad Power-as-a-Service avtal där all investering, ägande, elsäkerhetsansvar och drift och underhåll ingår.

Sådana satsningar kan underlätta för elektrifieringen av arbetsmaskinsmarknaden. Ett exempel på en implementation i byggbranschen är en NCC:s arbetsplats i Örebro (Vattenfall, 2021).

Det finns även fall då man har elektrifierat apparater och arbetsmaskiner men sedan driver dessa med hjälp av fossildriven generator (för att exempelvis inom byggbranschen flytta dieselutsläppen utomhus

[5] Mått och vikt spelar stor roll i vissa branscher. PU40 väger ca 900kg och har måtten 120 x 90 x 90 cm.

[6] Det finns begränsningar i vilka företag som tillåts vara aktörer. Enligt Elmarknadsdirektivet får exempelvis Svenska Kraftnät endast använda energilager för sin del i att balancera nätet och inte för att hyra ut till andra. I denna rapport syftas det på Vattenfall Network Solutions.

vid arbete inomhus). Detta är inte speciellt effektivt och gäller generellt för mindre maskiner, se exempelvis Husqvarna (Husqvarna, 2024).

Ett annat sätt att utföra arbeten i miljöer där tillgången till el är bristfällig eller där elnätets belastning är hög, förutom batterilösningar och fossildriven generator, är att använda en vätgasgenerator. En sådan lösning finns beskriven i ett pilotexempel, se kapitel 4.11.

Framväxten av energilager i samband med elektrifieringen av arbetsmaskiner öppnar upp för möjligheter att optimera nätbelastningen genom så kallad peak-shaving. Dessutom kan energilager erbjuda tjänster som stöd till elnätet och bidra till olika resiliensåtgärder. Med resiliens avses här förmågan att tillhandahålla elektricitet vid strömavbrott. Energilager möjliggör även mer komplexa system för nödström, vid haveri och bortfall i elnätet. Till exempel behöver många elektriska produktionsenheter, såsom solceller, extern strömförsörjning för att kunna fortsätta producera vid nätbortfall vilket kan tillhandahållas av ett energilager. På en större, nationell, skala kan energilager bidraga till att möjliggöra ett mer distribuerat system för generering av elkraft med många små källor vilket i sig kan öka resiliensen för sårbarhet både från extremväder och sabotage. Detta påverkar självklart elektrifieringspotentialen, men kommer inte att utforskas djupare här.

Tabell 3. Exempel på laddningstider för några arbetsmaskiner, för att illustrera att laddning via ett mobil energilager kan vara jämförbart med snabbladdning via en laddstation. Datakälla: (Volvo CE, 2024d), (Volvo CE, 2024e).

Laddningsalternativ	**Kompakta maskiner: Volvo CE:s EC18 och L25**	**Medelstora maskiner: Volvo CE:s EC230 och L120H**
Spänningsnivå	48V	600V
Laddkabel 11 kW AC	6h	
DC, snabbladdare 17.3 kW	1.25h-- 2h	
PU40 DC, 17 kW	1.25h-- 2h	
Laddkabel 22 kW, AC typ 2		10 h
Portabel 20/40kW DC		5.5 h
180 kW DC laddstation		1.5h
PU500		1.5h

3. Trender och utmaningar

Nedan diskuteras på ett övergripande sätt några trender och aspekter som blickar framåt och försöker sätta elektrifieringen av arbetsmaskiner i ett större sammanhang samt identifiera faktorer som kan vara av intresse för en framtidsutveckling. De trender som tas upp är kopplade till att aktörer tar på sig nya roller eller erbjuder nya typer av tjänster, samt att teknikutvecklingen inom elektrifiering fortsätter samtidigt som en ökad digitalisering och automatisering. Detta skulle kunna underlätta för elektrifieringen av arbetsmaskiner. Samtidigt finns det även utmaningar som beskrivs nedan.

3.1. Fler aktörer och ökad komplexitetsgrad

Som det diskuterats i kapitel 2.3.6, finns det en tydlig trend om att fler aktörer går in i nya områden, såsom att elnätleverantörer och arbetsmaskinsproducenter erbjuder utökade tjänster eller energilager som komplement till sina ordinarie produkter. Affärsmodeller som gör det möjligt att hyra batterier eller energilager kan underlätta.

Omställning till elektrifiering är inte bara en fråga om teknikomställning utan snarare en systemomställning och sannolikt krävs tidigare planering av arbeten för att optimera laddmönster, och körscheman.

Kunskapsfrågor kan också öka komplexiteten och vara avgörande. Detta gäller exempelvis kunskap kring regelverk vid komplicerade moment som att få på plats för laddstation och laddningsschema, men även rent praktiska moment såsom när en arbetare ska koppla in maskinen på laddning och kanske föredrar vanlig AC-laddning om denne tidigare ej haft erfarenhet av infrastruktur för snabbladdning. Det kan vara en försvårande omständighet om mängden av maskinerna på arbetsplatsen behöver laddas på olika sätt.

3.2. Teknikutveckling, automatisering och digitalisering

Fler intressanta trender som påverkar elektrifieringen är kopplade till en fortsatt teknikutveckling, inklusive miljöfrågor kring resursanvändning och återvinning som direkt påverkar andrahandsvärdet, och ökade möjligheter med automatisering och digitalisering.

Det pågår ständigt ny teknikutveckling, exempelvis vad gäller olika batterikemi som ger högre brandsäkerhet eller mer hållbar hantering av resurser, vilket såklart kan påverka kraven på hur ofta och hur snabbt och säkert man kan ladda. Optimering för batterilivslängd samt ”second life” och återvinning av batterier är heta forskningsämnen.

Sådana ändringar i de tekniska och ekonomiska förutsättningar som gäller påverkar den möjliga elektrifieringsgraden. Liknande frågor gäller även vätgaslösningar och utvecklingen av bränsleceller.

Vidare sammanfaller elektrifieringen med trender för automatisering och digitalisering. Elektrifieringslösningarna för vissa branscher är i högre grad beroende av att man just automatiserar laddningsprocessen, och har därför även större behov av delad information för att kunna optimera laddning och logistik.

3.3. Regelverk

Fler utmaningar är relaterade till tillämpning av de nuvarande samt behov och uppkomst av nya regelverk, så väl inom sektorn för arbetsmaskiner som inom andra relaterade sektorer. Vissa befintliga regelverk skulle behöva förtydligas eller anpassas till aktuella förhållanden.

3.3.1. Regelverk kring elektrifierade fordon och transport av batterier

Nya regelverk eller avsaknad av dessa påverkar möjligheten till elektrifiering i olika tillämpningar. Som exempel kan nämnas regler kring fordon och batterier, inklusive säkerhetsaspekter och

utbildningskrav. Det kan ibland finnas problem med reglerna kring transport av batterier. Dessa idag är beroende på användningsområde och inte helt tydliga. Exempelvis skulle en skogsmaskin med batteri kunna klassificeras som ett batteridrivet fordon, men om batteriet tas ut och transporteras separat på en släpkärra antas det ske en transport av farligt gods. Om batteriet däremot är integrerad som en del av släpvagnen skulle det åter igen kunna antas vara ett fordon. På samma sätt kan det finnas frågetecken kring regelverk som rör förvaring av batterier. På MSB:s hemsida kan man finna en sammanfattning av regelverk kring transport av batterier, inklusive lättnader och särbestämmelser (MSB, 2024) som skulle behöva beaktas. Vidare, råder det idag väldigt krav på att alla människor i kedjan ska vara specialutbildade i elsäkerhet vilket är något som kan hämma elektrifieringen på arbetsplatserna.

Vidare råder det otydlighet kring effekter av styrmedel, både nuvarande och kommande, som påverkar kostnadsuppskattningar för den som gör en investering i elektrifierade arbetsmaskiner. Exempelvis gällande nuvarande definitionen av ”miljöarbetsmaskiner” som kan få stöd i Sverige, dvs maskiner som är eldrivna med nettoeffekt på minst 15 kW, finns det aktörer som upplever som onödigt begräsande, och förespråkar en sänkning till 10 kW. Det är inte omöjligt att en sådan sänkning skulle kunna tillkomma i framtiden. Det finns också tidigare exempel på styrmedel som har förvunnit för snabbt vilket påverkar tilltron till långsiktigheten i liknande satsningar.

3.3.2. Kopplingar till vägsektorns utveckling via AFIR

En annan aspekt är möjligheten för synergieffekter med andra sektorer. Här kan AFIR nämnas, som är relaterat till ”Fit för 55” och är en förordning om infrastruktur för alternativa drivmedel (Alternative Fuels Infrastructure Regulation, AFIR) som antogs av det Europeiska rådet 25 juli 2023 och som under en lång tid framöver kommer att reglera utbyggnaden av laddinfrastruktur och tankinfrastruktur för lätt och tung trafik inom Europeiska unionen. Detta nya regelverk ställer krav på att alla EU länder bygger ett nätverk av normala och snabba laddningspunkter som minst ska uppfylla specifika standarder. Exempelvis längst det så kallade TEN-T vägnätets kärna kommer det att byggas en laddstation varje 60 km med lägst 7200 kW effekt, i övriga delar ska man ladda vid varje 100 km med krav på 3000 kW, med vidare krav vid ”urbana noder”, etc, visserligen med undantag för vägar med låg årsmedeldygnstrafik (ÅDT) som kan få lägre effektkrav. Detta laddningsnätverk beräknas komma halvvägs på plats redan 2025 och vara hundraprocentigt utbyggd 2030, vilket kan erbjuda eventuella synergieffekter vid laddning av elarbetsmaskiner. Liknande planering finns även för vätgas-tankinfrastrukturutbyggnad. Däremot finns inget explicit mål idag i AFIR som rör elvägar eller batteribyteslösningar.

3.3.3. Regelverk kring registrering av arbetsmaskiner

Kapitel 2.1 nämner att det finns vissa svårigheter med insamlade registreringsdata för arbetsmaskiner vilket förhindrar en pålitlig beräkning över de svenska arbetsmaskinernas verkliga utsläpp. Detta orsakas delvis av att det saknas ett heltäckande register över svenska arbetsmaskiner. Uppkomst av ett sådant register skulle teoretiskt sett kunna ha både fördelar och nackdelar vad gäller effekter på elektrifieringen, speciellt om det kan kopplas till valda laddinfrastrukturlösningar och elektrifieringsrelaterade besiktningsdata. Några uppenbara effekter vore möjligheter till bättre jämförelser mellan olika typer av maskiner, samt möjligheter till uppföljning och styrning, men det finns även nackdelar såsom ökad administration och kostnader. I Norge finns en frivillig arbetsmaskinregister som drivs av en stiftelse, och det finns studier som presenterar konsekvensanalys av införandet av ett register i Sverige, exempelvis se (Björk, 2022).

3.4. Nya typer av elavtal – temporära samt tjänst-inriktade

En viktig fråga vid elektrifieringen är huruvida energitillgång och kapacitet kan erbjudas på ett sätt som möter efterfrågan på kortare och på längre sikt. Bygg- och anläggningsprojekt som använder

elfordon kräver laddinfrastruktur och tillgång till elnätet under specifika och begränsade tidsperioder på vissa platser, och dessa behov är tillfälliga. Förutom att utbyggnaden av elnätet sker långsamt, kan det vara fördelaktigt att undvika en större utbyggnad av överföringskapacitet av elkraft än vad som kommer att behövas när byggprojektet är avslutat.

Hittills har man oftast haft så kallade primära avtal där energibolagen förbinder sig att leverera utlovad maxkapacitet under alla perioder. En ny trend finns där man introducerat så kallade sekundära avtal som villkorar strömförsörjningen.[7] Detta innebär att kunden accepterar att få några få tillfälliga begräsningar av levererad effekt under vissa förutsättningar, som exempelvis infaller i storleksordning ett par gånger om året. Detta gör det lättare att optimera elnäten i ett område och därmed lättare för elbolagen att bevilja nya anslutningar i ett område som man bedömer inte använder all sin kapacitet. Om användningen av eldrivna byggmaskiner på en byggarbetsplats ökar, kommer efterfrågan på el i området att stiga. Detta kan dock ibland fortfarande ligga inom den normala kapaciteten för området.

Det är därmed viktigt att effekt och effektbehov är väl kartlagt innan ett projekt startas och att tillräcklig tillgång till ström kan säkerställas.

Även i områden utanför storstäderna är dessa typer av frågor viktiga, då det kan vara ett problem både att få fram tillräckligt med elkraft till maskinerna, men även vad man ska göra åt överkapaciteten när arbetet är färdigställd ifall man har byggt ut en permanent anslutning enkom för en entreprenads behov. En del av dessa problem kan istället lösas via mobila eller fasta energilager, se även diskussion i kapitel 2.3.6.

Om man tar fram energilager har man nya potentiella möjligheter till att optimera laddning för både egna och andras fordonsflotta, delta i så kallad peak-shaving, och även möjlighet att delta i elnättjänster och stödja elnätet. Att därmed gå in som aktör på elmarknaden är ytterligare en trend, och har även en parallell där hushåll som installerar solpaneler väljer att också installera stationära batterilager.

3.5. Avsaknad av oberoende och validerade kostnadsberäkningsmodeller

Uppskattning av exakta kostnader ligger utanför denna delstudie, men det har framkommit vid samtal med aktörer att det saknas bra verktyg för oberoende kostnadsberäkningar över exempelvis den totala livslängden för en elektrifierad arbetsmaskin och dess laddinfrastruktur. Typiskt läge är att kostnaden för själva arbetsmaskinen fortfarande är mycket högre för den elektrifierade alternativet jämfört med motsvarande konventionella, och det tillkommer en varierande kostnad beroende på specifikt fall av laddinfrastrukturlösning. Laddinfrastrukturen är också dyr vilket gör att det inte alltid kompenseras av att driftkostnader typiskt är mycket lägre vid eldrift. Det finns även andra effekter såsom arbetsmiljöförbättringar vad gäller buller och luftföroreningar som ej lätt går att prissätta. Totala kostnaderna för systemet maskin och infrastruktur över hela deras livslängd är beroende på flera faktorer och användningsmönster.

[7] Personlig kommunikation, Eon, juni 2024.

4. Axplock av utvalda piloter och exempel i Sverige

I detta kapitel presenteras en lista på utvalda relevanta exempel och piloter i ett antal branscher i Sverige. Denna lista är inte på något sätt heltäckande utan ska enbart ses som ett sätt att illustrera status och pågående utveckling för elektrifierade arbetsmaskiner och deras infrastruktur. I flera av fallen har det funnits en begränsad tillgång till information och det har därför varit extra värdefullt när en direkt kontakt med representanter med insikt kunnat nås.

4.1. Slakthusområdet

Slakthusområdet är ett pågående pilotprojekt med elektrifierade arbetsmaskiner som äger rum i samarbete med Skanska och Stockholm stad. Den blir den första svenska anläggningsprojekt med Volvo CE:s nya helelektriska 23-ton tunga grävmaskin EC230, se även Figur 1. I projektet används förutom denna stora elektrifierade grävmaskin även en elektrifierad borrigg, ett elektrifierat krossverk, och en mindre arbetsmaskin som går på el.

Projektet som planeras bli klart år 2033, bygger tre tusen bostäder och fjorton tusen arbetsplatser i vad som marknadsförs som Sveriges största fossilfria entreprenad (Volvo CE, 2024c). Man har som mål att ca 10% av maskintimmarna blir elektriska, samt har krav att alla andra maskiner ska köras med biodrivmedlet HVO (hydrogenated vegetable oil).

En mycket intressant aspekt vad gäller infrastrukturen i detta fall är att det av historiska orsaker redan fanns en färdig elnätuppkoppling med hög effekt och närliggande transformatorstation på plats.[8] På det viset behövdes det inga ytterligare initiala insatser för att underlätta elektrifieringen inför projektstart. Man räknar med att täcka laddningsbehoven via nattladdning men kan även ta fram snabbladdare på 150kW om ytterligare behov skulle uppstå.

Viktiga insikter kommer att kunna samlas kring användningen av arbetsmaskiner i detta projekt. Inte minst vad gäller hur man bäst planerar laddning av den stora grävmaskinen i kombination med arbetstidsscheman samt beroende på maskinens exakta användning som resulterar i olika batteriladdnivåer under olika tider.

4.2. Förskolan Ottfjället

Ett annat pågående projekt med elarbetsmaskiner från Volvo CE är byggnationen av förskolan Ottfjället i Östersund. Den byggs nästan enbart med eldrivna maskiner (till ca 95%), och marknadsförs som ”EU:s första elektrifierade byggarbetsplats” (Skanska, 2024). Även den använder sig av Volvos elektriska 23-tons grävmaskin EC230, och även L25, en elektrisk kompakt hjullastare från Volvo CE (se Figur 1 och Tabell 2), en elektrisk betong/spackel pump, samt en elektrisk tornkran.

Projektet startade 2023 och planeras bli klart i årsskiftet 2024–2025. Det är oklart om bygget kräver extra energilager, projektet pågår fortfarande och har ännu ej publicerat någon slutrapport. Projektet är ett samarbete mellan Östersund kommun, Fossilfritt Sverige, Volvo Construction Equipment och Skanska och är ett exempel på försök att driva på elektrifieringen via offentliga upphandlingar då målet för projektet är att ”öka takten i omställningen genom klimatkrav i offentliga upphandlingar” samt ”visa att en utsläppsfri byggarbetsplats är möjlig redan idag.” (Skanska, 2024).

4.3. Electric Worksite

Electric Worksite, eller E-worksite, är ett nyligen avslutad FFI-finansierat projekt, även den med elektrifierade arbetsmaskiner från Volvo CE. Projektet har pågått mellan 2021 och 2024, och varit ett

[8] Personlig kommunikation, Stockholms stad, juni 2024.

samarbete mellan Göteborg stad, Volvo CE, NCC och ABB. I detta fall finns det en nyligen publicerad rapport med mer information och slutsatser (Bern, 2024).

Syftet med projektet har varit att öka kunskapen kring integrationen av elektrifierade hjulgrävare och bandgrävare av olika storlekar, och den har även studerat aspekter runt elektrifiering såsom luftkvalitet och buller och allmän arbetsmiljö; samt även påverkan på elsystemet via tillhörande energiförsörjning och nätsanlutning, laddinfrastruktur och energilager, etc.

Maskinerna som används inkluderar L25 Electric och ECR25 Electric samt en 30-ton nätansluten grävare med anslutning via kabel. Flertalet av maskinerna har varit i olika prototyp-faser, oftast har det varit enskilda maskiner som testats per byggarbetsplats.

Förutom nätanslutningen för bandgrävaren har man också använt en laddare från ABB med max effekt på 350 kW (även om maskinen tagit emot mindre effekt).

Resultaten kan sammanfattas i följande punkter:

- Elektrifierade maskiner finnes vara likvärdiga med de fossildrivna. Positiv arbetsmiljö upplevs runt maskinerna, inklusive effekter av de ändrade förutsättningar som att säkerställa laddning och elförsörjning.
- Man tar upp att kravställningen från beställare behöver uppdateras med de ny tekniska möjligheterna och inte minst vara noggrann med att följa upp kraven med mätningar.
- Man diskuterar att elektrifiering kommer att ställa krav på elnät och laddinfrastruktur vid en snabb uppskalning, men att det finns möjligheter att möta upp behoven med energilager och flexibla lösningar.
- Vidare tas det upp att elektrifiering öppnar för effektivisering av byggprocesserna och att god planering och framförhållning i alla led är framgångsfaktorer.

4.4. Elektrifiering av tätorternas masshantering samt elektrifierad bandvagn

Elektrifiering av tätorternas masshantering är ett projekt som drivits av Ecoloop och Vattenfall med flera under våren 2020 med stöd av Energimyndigheten och med fokus på entreprenad- och masstransporter på en byggarbetsplats (Ecoloop, 2020). De viktigaste slutsatserna är återigen:

- Det är viktigt med en fungerande batteri- och laddinfrastruktur för eldrivna arbetsmaskiner med stora effektbehov.
- Man behöver bättre förstå användar- och beteendemönster.
- Samarbeten kring upphandling behövs för att ”lösningarna kan anpassas till praktisk och ekonomisk användning”.

Det pågår även ett väldigt intressant arbete med att ta fram en unik elektrifierad bandvagn, vilket planeras rapporteras i pressrelease inom kort[9]. Det som driver utvecklingen i detta fall är inte ett forskningsprojekt utan sker på Vattenfalls egna initiativ som siktar på förbättrad arbetsmiljö och nya möjligheter. Bandvagnen tänks efterlikna de fossildrivna bandvagnarna som har effekt på ca 100kW och kommer även kunna agera som mobilt energilager med funktionalitet både att stödja nätet och kunna kopplas mot last (”vehicle-to-grid” samt ”vehicle-to-load”).

[9] Personlig kommunikation, juni 2024, Vattenfall.

4.5. Kvarteret Persikan

Ett annat pågående byggprojekt som är en elektrifieringspilot i Stockholm är Kvarteret Persikan på Södermalm i Stockholm där Peab bygger en ny stadsdel och ca nya 1200 bostäder med hjälp av elektrifierade arbetsmaskiner och snart även en ”stor laddstation” enligt pressmeddelandet (Stockholms stad, 2024), (Anläggnings världen, 2024). Man använder sig av flera elektriska maskiner och verktyg, bland annat helelektriska hjulgrävaren Elsa på 18 ton som klarar 8-10 arbetstimmar per laddning vid ”normal belastning”. Denna maskin kommer från maskinentreprenören Vabeko och är en Develon DX165W Electric, 104kW, med utbytbart Powerbox 400.

Kvarteret Persikan är ett fyrårigt projekt tillsammans med KTH som startade i januari i år, som ska utvärdera bland annat driftskostnadsskillnader mellan maskiner med eldrift och traditionella fossildrivna arbetsmaskiner. Man har succesivt ökat elektrifierade bestånden till även att inkludera en till eldriven hjulgrävare döpt till Elvis.

Till skillnad från fallet med Slakthuseområdet så fanns här inte någon färdig högeffektsuppkoppling mot nätet redan innan start. Man har därför förstärkt laddinfrastrukturen med ett batterilager som kan snabbladda med 150kW under lunchpauser. Vad gäller ägandeformen är det Northvolt som äger batterierna och entreprenören som hyr.[10]

I likhet med andra piloter kan detta projekt ge värdefulla insikter kring det faktiska användandet av arbetsmaskinerna i specifika fall.

4.6. Electric Farm 1 & 2

Electric farm, del 1 och 2, är ett Volvo CE-projekt som finansierats via Energimyndigheten och pågått under åren 2019 till 2023. Fyra olika lantbruk har varit inblandade, inklusive Menhammar stuteri, och fokus har varit på en kartläggning och modeller av energibehovet, inklusive användandet av sol-el (som på Menhammar stuteri rapporterats varit källa för hundraprocent av värme och el-behovet) (Volvo CE, 2024a), (Vinnova, 2020). Flera olika maskiner har använts, bland annat Volvo CEs elektriska hjullastare L25.

4.7. Elektrifierade gruvmaskiner

En av de ledande aktörerna för arbetsmaskiner för gruvdrift är Epiroc. Som nämns i kapitel 2.3.5, erbjuder de både ovanjord och underjordiska el-lösningar (Epiroc, 2024). Flera av maskinerna erbjuds med batteribyteslösningar, men även kabeldrift används för vissa maskiner. Batteriet täcks typiskt av ett ”battery as a service”-avtal (BaaS) där batterierna är framtagna i samarbete med Northvolt och hyrs ut som en del i avtalet.

En intressant aspekt med Epirocs batteribyteslösning är att systemet är anpassat för större gruvmaskiner och är mycket välutvecklat. Batteribytesstationerna är fasta, dvs flyttas inte runt. Själva batterierna är anpassade till den specifika branschen och är stora och tunga, vilket inte gör dem generellt lättplacerade på andra typer av arbetsmaskiner.

Väldigt positiva resultat kopplas till elektrifieringen: bra prestanda, besparingar inom ventilation, energi, kylning, hälsoeffekter, med mera. Hinder som finns är relaterade till markåtgång, där det inte alltid finns plats till den infrastruktur som behövs i en befintlig gruva, utan elektrifieringen är lättare om man kan ta hänsyn till behoven från start i en ny gruva.

[10] Personlig kommunikation, Stockholms stad, juni 2024.

4.8. Elvägspiloter i gruvor

Med ursprung i ett Energimyndigheten-finansierat pilotprojekt från 2018, har Boliden byggt Eltrolley-banor i Gruvan Aitik i Norrbotten samt finska gruvan Kevitsa. I det första fallet finns fyra gruvtruckar konverterade till eldrift, på en bana på ca 700m som byggs ut, och i det andra fallet, under år 2022 i Finland har man ett större omfång på 24 truckar och en 1.3 km lång bana. ABB och Eitech har stått för infrastrukturen och Caterpillar och Pon Equipment för ombyggnationen av truckar (Mining Magazine, 2019).

4.9. Skogspilot och Jordbrukspilot med modulärt batteribytessystem

Det nyligen avslutade projektet *Modulärt batteribytessystem för arbetsmaskiner* som koordinerats av RISE har resulterat i två spännande elektrifieringspilotmaskiner. Detta projekt har dubbelfokus på både jordbruks- och skogsbranscherna. I detta fall använder man sig av en modulärt batteribyteskoncept. Man har designat från grunden ett (modulärt) batteripack som används i båda arbetsmaskinerna. För jordbruksmaskinen använder man en dubbelpack, och för skogsmaskinen används en enkel modul. Batteribytet för jordbruksmaskinen sker på en automatisk bytestation som man också designat själva, där en helt egenutvecklad autonom jordbruksmaskinsprototyp kan byta batterier själv. Samma batteri använts i en ombyggd elektrifierad skogsmaskin från Malwa Forest. Där sköts batteribytet manuellt.

Projektet har ursprungligen påbörjats via FFI-stöd från Vinnova, och omfattar tvååriga samarbeten med start 2021 tillsammans med Malwa forest, Traktorarvid, med flera. En slutrapport på den första fasen håller på att avslutas samtidigt som denna delstudie, och man har fått ett fortsättningsprojekt beviljat. Den avslutade fasen har fokuserat på att utveckla koncepten samt demonstrera prototyperna, dvs att demonstrera innovativ teknik. I fortsättningsprojekten kommer man att studera bland annat arbetscykler. Totalt har man förutom de två elektrifierade maskinerna även tagit fram infrastrukturlösningen som består av sju batterimoduler och en batteribytestation med tillhörande programmering av BMS.

Jordbruksmaskinen som utvecklats heter Drever 120 och är en eldriven autonom traktorn designad och byggs av Traktorarvid AB med hjälp av RISE, Regal och Hydraspecma. En ny generation av denna kommer att utvecklas i nästa fas. Drever 120 är en förarlös och självkörande batteridriven traktor som kan harva själv. När batteriet tar slut kör den autonomt till en flyttbar batteribytesrobot som står vid fältkanten och byter till sig till ett fulladdat batteri för att därefter fortsätta arbeta. Detta innebär att den kan kompensera sin mindre storlek än dagens maskiner med att arbeta längre tider och uppnå samma produktivitet.

Skogsmaskinen, en ombyggd Malwa Combi 560, är framtagen i samarbete med Malwa Forest, ett svenskt företag grundat 2009. Den är ombyggd och kallas för ”världens första eldrivna kombimaskin” då den är både skördare och skotare som användas som kompakt gallringsmaskin för skogsskötsel (Malwa, 2024). En positiv förutsättning har varit att företagets kundbas ligger i tätortsnära skogsbruket, något som inte gäller alla skogsmaskiner, vissa av vilka arbetar mycket långt ifrån elnätet. Eftersom man har byggt om en serietillverkad maskin med dieselmotor har man behållit drivlinor och hydraulik och maskinen är lätt att känna igen för kunderna.

Man har kommit fram till många intressanta insikter, t ex att batteribyte medger en teknisk effektiv lösning till låga kostnader förutsatt att man implementerar på ett klokt sätt. Just för arbetsmaskiner som är säsongsbundna och under längre perioder inte behöver användas möjliggör dessutom den tekniken att plocka ut batterierna och använda i andra maskiner, vilket sänker kostnaden. Flera olika laddningsupplägg kan tänkas kunna tillämpas, exempelvis att ha enbart två cirkulerande batteripackar, en i maskinen och en på laddning i närheten av arbetsplatsen, eller att ha flera batteripackar som laddas längre bort när laddningsmöjlighet inte finns nära. Batteristationen i projektet har hittills använts som batterilager på plats, men det är först i fortsättningsprojektet som man kommer studera

exakt hur drivcyklerna ser ut och hur en optimering kan se ut. Man tror att det kommer att krävas täta batteribyten. Andra intressanta aspekter som nämns och som behöver utredas är regelverksfrågor, såsom att transportera, samt att batterier är stöldbegärliga och skulle eventuellt behöva skyddas.

Batteripacken som utvecklats i projektet väger ungefär 330kg, har en kapacitet på 28kWh, och fungerar på systemspänning 80V. En högre spänning skulle gett lägre strömmar vid höga effektuttag, men skulle tillfört mer komplicerat byggnation mer fler regelverk.

Mer information om det avslutade och det nya projektet finns hos RISE samt i en färsk slutrapport (RISE, 2024), (Engström, o.a., 2024).

4.10. Elektrifierad skogsgallring med drönare

De elektrifierade skogsmaskinerna behöver inte nödvändigtvis vara landgående, och det finns även helt nya koncept som undersöker möjligheterna att avverka skog från luften utan markskador. AirForestry är ett svenskt start-up företag baserat i Uppsala som sedan 2020 arbetar med att förverkliga idén att gallra skog via en batteridriven drönare som kvistar trädet från toppen och ner, kapar sedan trädet vid roten och lyfter det ur skogen (AirForestry, 2024), (I skogen, 2021), (Uppsala Universitet, 2023). Den fullskaliga prototypen som utvecklas just nu är 6.2 m i diameter med sex propellrar, uppskattas tåla vindhastigheter upp till 11 m/s samt regn och snö, och styrs från en operatörstation. Den förväntas klara av att hantera mindre träd på ca 140 kg, motsvarande 22 cm trädstamsdiameter, medan själva skördeverktyget väger ca 60 kg.

4.11. Vätgasexempel

Flera exempel med vätgaslösningar för arbetsmaskiner nämns i korthet nedan. Eftersom tankinfrastrukturen för vätgas befinner sig i en något tidigare fas än de infrastrukturlösningar som finns för batterielektriska maskiner och fordon, är det rimligt att förvänta sig något färre skarpa studier och piloter och fler projekt på prototypstadiet.

Exempel på utvecklade vätgasdrivna arbetsmaskiner inkluderar både sådana som använder vätgas i kombination med bränsleceller samt utvinner energi via förbränning. De olika teknikerna har olika för- och nackdelar, se även kapitel 2.2.6. Konkreta exempel inkluderar JCB som har utvecklat en vätgasdriven grävmaskin med ICE motor, JCB 220X, samt Volvo CEs bränslecellsdumper ptototyp kallad El-Kalle (Electric Charlie) HX04. Den senare började att testas 2022 och anses vara världens första prototyp av bränslecell-driven dumper. Den kommer kunna laddas med 12 kg vätgas på 7.5 min vilket håller för normaldrift på fyra timmar. Den utvecklas vid Volvo CE's testbana i Braås och tankas på en Shell-station i närheten.

Ett annat exempel är det pågående pilotprojektet i Göteborgs hamn, terminalområdet Arendal 2, ett samarbete mellan flera aktörer. Projektet, som är Göteborg hamns största infrastrukturprojekt någonsin, skulle blivit klart 2023 men är något försenat och har planerat en vätgasgenerator och laddstation där arbete med arbetsmaskiner i hamnen kommer kunna utföras (Svensk Åkeritidning, 2024). Vätgasgeneratorn kommer från Hitachi energi, och detta är dess första demonstration på en faktisk arbetsplats. Bränslecellslösningen kommer från Power Cell Group. Projektet koncentrerar sig framför allt på de tekniska aspekterna, och indikerar positiva resultat. Slutvisionen sägs vara att kunna omvandla grön vätgas till grön el, och försörja både de elektriska maskinerna i hamnen, och även kunna avlasta vid höga belastningstoppar när många fartyg är anslutna till hamnen samtidigt. Man framhåller även att tekniken i framtiden skulle kunna används i kombination med andra lösningar, som exempelvis batterilager, biobränsle eller liknande (Tidningen Näringslivet, 2024), (Byggnyheter, 2024) (Maskinentreprenören, 2024).

Som det diskuterats kort i kapitel 3.3.2, ingår det en utbyggnad av tankinfrastruktur för vätgas i EUs förordning AFIR, och man förväntar sig att ett relativt stort nät med vätgasstationer kommer att byggas ut i hela landet inom en kort framtid. Det finns dock en viss osäkerhet kopplat till hur detta

kommer att påverka tillgången av vätgas för branschen av arbetsmaskiner. AFIR är inriktad på tunga transporter vilket betyder att om infrastrukturen byggs och om det initialt skulle finnas brist på vätgas, så kommer arbetsmaskinerna konkurrera med efterfrågan från lastbilstransporter.

5. Exempel utomlands

5.1. Kina

Hög elektrifiering är mål i Kina även för arbetsmaskiner. Även där har elektrifierade bilar och lastbilar nått en högre elektrifieringsgrad är de i arbetsmaskinsektorn. För elektrifierade lastbilar finns en trend att batteribyteslösningarna ökar, exempelvis står batteribyte för tunga lastbilar för över hälften av nyförsäljningen (Arne Nåbo, 2024). Typiska batteristorlekar som erbjuds för sådana tunga fordon är på 282kWh, som exempelvis den framtagen av kinesiska CATL i samarbete med Foton new energy. En intressant observation är att tillgång till elektricitet inte verkar vara en utmaning i kinesiska sammanhang.

En stor del, över 16%, av den globala marknaden för "construction equipment" (vilket utgör en delmängd av alla arbetsmaskiner) utgörs av fem kinesiska aktörer - XCMG, SANY, Zoomlion, LiuGong, and Lonking (Tong, o.a., 2021), se även . Därför är Kina en viktig faktor för utvecklingen. Kina har introducerat en utsläppsstandard för "non-road construction machines" år 2007 och därefter gradvist ökad kraven, senast 2022, och man räknar med att år 2030 kommer antalet elektriska nollutsläppsbyggmaskiner som används i Kina nå 20% (Tong, o.a., 2021).[11]

En intressant skillnad mellan utvecklingen av elektrifierade arbetsmaskiner i Kina jämfört med motsvarande i Europa och USA är valet av batterikemi som huvudsakligen används. Kinas satsningar har lutat mot litium-jon batterier av typen litiumjärnfosfatbatterier (LiFePO4 eller LFP), medan Europa och USA har satsat mer på litium-jon batteriteknolog med nickel, mangan och kobolt som katod-material (NMC). Dessa skiljer sig vad gäller olika karakteristiker som kan påverka egenskaper som är avgörande i olika arbetsmaskinsbranscher. Nedan beskrivs i grova drag några av avvägningarna. Generellt är NMC versatila battericeller med bättre prestanda, dvs högre energidensitet och möjligheter till snabbladdning, men de klarar sig sämre vid höga temperaturer samt är dyra per kWh vilket ger en högre initial inköpskostnad och kan upplevas som ett hinder speciellt för större maskiner. LFP är billigare, har generellt längre livslängd och klarar operation i högre temperaturer men har i gengäld svårare med prestanda vid lägre temperaturer. Deras lägre energidensitet kan medföra en högre batterivikt vilket kan vara hinder i vissa branscher där vikt avgörande, såsom vissa fall i jordbruk- och skogsbranscherna.

Man har inte samma typ av tillvägagångssätt med vikt på piloter som i europeiska sammanhang och för denna studie har inga rapporter för forskningspiloter och deras utvärderingar kunnat identifieras pågående i Kina. Kinesiska tillverkare är dock aktiva i samarbeten med europeiska företag.

5.2. Norge

Norge har likt Sverige åtagit sig att minska utsläpp med mål för år 2030 och har hanterat detta genom att aktivt fasa in utsläppsfria fordon, i vissa fall med hög tolerans mot högre kostnader. De är ett tydligt exempel där man har försökt påverka elektrifieringsutvecklingen via offentliga beställare. I Oslo kommun är sedan 2019 ambitionen att alla kommunens byggprojekt ska ha nollutsläppskrav, så långt det går, med bland annat hänvisning till en uppskattning att byggmaskiner motsvarar ca 30% av totala utsläppen från trafiken i Oslo. Därför används det flera elektrifierade arbetsmaskiner – större elmaskiner är främst ombyggda, konverterade dieselmaskiner, men det finns även sådana som är designade för eldrift, samt prototyper som olika tillverkare håller på att testa och utveckla. Som nämnt innan lanserade exempelvis Volvo CE sin 23-ton tunga EC230 först i en förserie på den norska marknaden år 2023 innan den nu används i projekt i Sverige under 2024. De flesta lösningarna i Norge ser ut att vara sådana med fast batteri, men även andra lösningar finns såsom kabeldrift, vätgas,

[11] Denna ambitionsnivå ligger grovt i linje med Volvo CE:s mål att sälja 35% elektrifierade arbetsmaskiner 2030.

kombination av kabel och batteri, m.m. Även där anses dock tillgången på utsläppsfria byggmaskiner för närvarande vara relativt begränsad jämfört med konventionella maskiner. Speciellt för tunga maskiner finns litet utbud och då enbart prototyper, men man hoppas att när efterfrågan ökar, kommer även utbud och produktion ta fart.

En väldigt bra sammanfattning över läget inklusive en lista på befintliga elektrifierade arbetsmaskiner och deras karakteristik har tagits fram av TØI år 2021 (Amundsen, 2021). Exakta kostnader för olika lösningar ligger utanför denna studie men som en fingervisning kan det vara intressant att här omnämns att konverterade eldrivna grävmaskiner har kostnader som är cirka tre gånger högre än dieselversionen av samma maskin. Man räknar dock att priset blir lägre vid serieproduktion. Ett exempel på målsättning för norska tillverkare är Rental Group som spår att 50% av investeringarna år 2025 kommer vara inom nollutsläppslösningar, varför de nyligen har annonserat samarbete med två kinesiska tillverkare, Sany Mining och LiuGong (Rental Group, 2024).

Inte oväntat har man funnit vid testerna i Norge att man behöver planera laddning, och optimera driften, exempelvis anpassa till de tillfällen när batterierna har lägre kapacitet pga kyla.

5.3. Nederländerna

Nederländerna är ett annat land som satsat på att vara ledande i elektrifieringsfrågor. Man kan specifikt nämna staden Utrecht som utmärkt sig i det avseendet.

Det finns flera pågående pilotprojekt som har handlat om att bredda vägar eller förstärka skyddsvallar där man använt batteridrivna fordon med fasta batterier, snabbladdade via batterilager, mobilt eller stationärt. Även vätgasdrift (via bränsleceller) och batteribytesmaskiner av Staad group, med manuellt byte har använts, men inga rapporter över slutsatser har kunnat identifieras.

Aktörer som nämnts tidigare i denna delstudie är Staad (med Webasto och ECE). Staad skriver på sin hemsida att förutom fossila maskiner, erbjuds egen konvertering till elektrisk drivlina (benämns Electric) samt det finns upplägg till laddinfrastrukturprodukter (benämns Fusion) där man visar bilder på två power boxar på 140 samt 400 kWh (Fusion Energy, 2024).

Ett annat företag Agromec erbjuder en batteribyteslösning för jordbrukstraktorer som har använts på bondgårdar och byggarbetsplatser i Nederländerna. Denna har ett litet batteri på 70 kWh under motorhuven, samt en utbytbar batteri på 140 kWh från ECE/Webasto som kan kopplas i frontlyften (Agromec, 2024).

Man kan vidare nämna att Volvo CE har investerat i Nederländska Limach som bygger om Volvo CE maskiner (Volvo CE, 2022).

Gemensamt verkar vara att det är entreprenörerna som tar fram lösningarna och ej beställaren, däremot finns det stödsystem och styrmedel.

5.4. Övriga länder – USA, Sydkorea, m.m.

Aktivitet pågår även i många andra länder. T ex i Sydkorea planerar Hyundai släppa både elektriska och vätgasdrivna grävare 2023 och 2026 (Equipment Journal, 2022), samt även en vätgastankstation som certifierad produkt.

Ett exempel på pilotprojekt i USA är ett större projekt i Los Angeles hamn, port of LA, Green Omni Terminal Project, avslutat 2023. Målet där var att minska utsläpp från: “ships, trucks, trains, harbor craft, and cargo handling equipment” via “incorporation of onsite solar power and battery storage into a microgrid.”. Man rapporterar att 1MW tak-installerade solceller kan potentiellt täcka hela energiefterfrågan för terminaloperationer. I listan på vilka fordon som elektrifierats återfinns förutom batterielektriska lastbilar även fyra stycken batterielektriska ”yard tractors”, tre batterielektriska 21-ton tunga gaffeltruckar etc (Port of Los Angeles, u.d.).

6. Slutsatser och insikter gällande främjande av elektrifieringen

Denna breda delstudie har gett en överblick över vilka tillgängliga tekniker som finns till förfogande vad gäller elektrifierade arbetsmaskiner idag och läget i några olika branscher. Den beskrivna statusen för elektrifieringen har även illustrerats via ett antal utvalda intressanta exempel och piloter inom elektrifierade arbetsmaskiner och deras infrastruktur, både i Sverige och utomlands. Flera faktorer och utmaningar har identifierats och kopplingar mot trender i relaterade sektorer har diskuterats.

6.1. Kort summering om branschernas status och utmaningar

Sammanfattningsvis, sker det en allt snabbare elektrifiering av tyngre och mer kraftfulla arbetsmaskiner och fordon såsom exempelvis grävmaskiner och hjullastare, dock från en låg nivå av elektrifieringsgrad. Gruvindustrin är den bransch som generellt anses ha kommit längst idag. En transformation mot elektrifiering av byggnadsbranschen är också pågående vilket illustreras i flertalet beskrivna aktiva projekt med elektrifierade arbetsmaskiner i avancerade stadium. Jordbruks- och skogsbranscherna möter större utmaningar, även om lyckade piloter finns att hitta även där.

Ur ett tekniskt perspektiv dominerar batterilösningar som de mest robusta och etablerade alternativen idag, men det finns en beredskap för att andra lösningar kan få genomslag i framtiden. Batterilösningar är ofta redan tillgängliga på marknaden i Sverige, även om tillämpningen varierar mellan olika branscher. Som kontrast befinner sig vätgaslösningar fortfarande i en något tidigare fas. Det finns en trend att tillverkare som erbjuder elektrifierade arbetsmaskiner också börjat erbjuda energilager som möjliggör drift även med en svagare nätanslutning.

Det är svårt att få klara procentsatser över vilken andel elektrifieringen har nått i olika branscher, samt uppskatta hur mycket som drivs av intrinsiska faktorer eller påverkats via satsningar utifrån. Det är tydligt att branscherna har väldigt olika förutsättningar för att uppnå en hög elektrifiering på kort sikt. En nyckelfaktor är just infrastrukturens utformning och möjlighet till att stödja elektrifieringslösningar i konkreta fall. Denna kan vara en flaskhals, men det finns även exempel, framför allt för piloter i byggsammanhang, där infrastrukturen har varit lättare att ordna än man trodde initialt, samt indikationer på att det ibland kan finnas möjligheter att lösa problemen om man angriper frågan på nya sätt, exempelvis med mindre men fler till antalet elektriska maskiner. Utformningen av infrastrukturen är nyckelförutsättningen för vilken optimering av logistik är möjlig.

Det finns flera aktörer som driver på utvecklingen från olika håll. Dels drivs detta via producenter som erbjuder nya elektrifierade produkter. Exempelvis är inhemska Volvo CE en ledande aktör i byggnadsbranschen och Sandvik och Epiroc i gruvindustri-sammanhang, men det har dykt upp även nya aktörer som erbjuder ombyggnationer av befintliga fossilalternativ och kompletterar producenternas roll. Dessutom finns aktörer som påverkar genom att erbjuda energilager, samt elbolag kan påverka genom att erbjuda nya typer av kontrakt. Vidare drivs vissa av de beskrivna elektrifieringsexemplen i denna studie via beställare med politiska motiv.

Det finns synergier i omställningen till elektrifierade lösningar mellan sektorer, det gäller bland annat utveckling av tekniken i elektriska komponenter, produktion av batteri och standarder, men det finns också tydliga skillnader. Till exempel är batteribyte en något mer etablerad lösning på arbetsmaskinsmarknaden än i sektorerna för lätt och tung trafik, vilket tyder på att utvecklingen kan skilja sig åt mellan sektorerna. Andra lösningar, såsom vätgasbaserade alternativ, finns i huvudsak som prototyper, men det är svårt att förutsäga hur dessa kommer att utvecklas.

När det gäller internationella jämförelser är det en utmaning att få fram korrekta data. Till exempel är batteribyteslösningar utbredda i Kina, men det är svårt att fastställa den verkliga elektrifieringsgraden inom de olika arbetsmaskinbranscherna även där och kunna jämföra med svenska förhållanden.

Slutligen, enskilda aktörer (exempelvis en byggfirma) möter ett komplext problem när de ska ta fram en trovärdig kalkyl på en investering i en elektrifierad lösning, på grund av flera osäkerheter. Om

uppskalning ska ta fart så måste det vara enkelt att räkna hem en investering i en elektrifierad maskin (inklusive behövd infrastruktur) och det behöver vara tydligt mer lönsamt en konventionell teknik för att det stora flertalet ska våga investera. Oberoende kalkyler och transparens kring regler och styrmedel som visar vad som krävs i specifika fall, skulle kunna kunna driva processen av elektrifiering i de olika branscherna från intrinsiskt håll. Det är svårt i nuläget att uppskatta kostnader och effekter av olika regelverk, exempelvis synergier med AFIR, regelverk för transport av batterier och krav på utbildning som av dessa har nämnts i denna rapport, se kapitel 3.3.

6.2. Analys och diskussion av faktorer som påverkar

Baserat på det kunskapsläge som redovisats i denna rapport resonerar vi här om faktorer som påverkar förutsättningarna för att använda elektriska arbetsmaskiner och specifikt att etablera laddinfrastruktur alternativt tankning av vätgas. Elektriska maskiner kan som nämnt förses med elektrisk energi antingen direkt från elnätet, från ett batteri eller från en bränslecell. Man kan också använda vätgas i en förbränningsmotor. Både vätgas och elektricitet är lösningar som i stor mån undviker utsläpp av växthusgaser förutsatt att de är hållbart producerade. Idag är mer än 98% av svensk elproduktion producerad av icke fossila källor (Ekonomifakta - El fakta, 2024). Av världens vätgasanvändande är dock mindre än 1% hållbart producerad enligt IEA (IEA, 2024).

När det gäller elektrifiering via laddbara batterier, maskiner som är anslutna direkt mot elnätet, eller batteribyte förändras komplexiteten i hela system, i och med att en tätare och, eventuellt dubbelriktad, koppling görs direkt mot elkraftsystemet. När det gäller förståelse för förutsättningar att elektrifiera och etablera laddinfrastruktur bör således många faktorer beaktas, när det gäller både ekonomi och operationella förutsättningar. I rapporten diskuteras följande faktorer:

- Logistik – Logistiken i arbetsflödet kan påverkas både positivt och negativt av faktorer som har med laddinfrastruktur att göra. En maskin som måste stå stilla för laddning kan ha en negativ inverkan på hela arbetsflödet och minska produktiviteten. Å andra sidan kan en maskin som är direkt ansluten till en energikälla eller använder en smart laddlösning möjliggöra kontinuerlig drift och därmed öka produktiviteten till nivåer i paritet med fossildrivna alternativ. Inom energiförsörjningen kan olika lösningar ge upphov till olika strategier, såsom fast anslutning till elnätet eller transport av energilager till och från arbetsplatsen.
- Kostnad för laddinfrastruktur – Kostnaden för laddinfrastruktur påverkas av flera faktorer, bland annat samutnyttjande med andra användare, användning av energilager och batteribyte. En noggrann kostnadskalkyl måste baseras på specifika omständigheter såsom exempelvis tillämpning, plats och kapacitetsbehov. Genom att ta hänsyn till dessa variabler kan man få en mer exakt uppskattning av de totala kostnaderna och identifiera de mest kostnadseffektiva lösningarna.
- Kostnad för tankinfrastruktur – Tankinfrastrukturen för vätgas är inte lika etablerad som för andra bränslen. En utvecklad publik laddinfrastruktur underlättar då även arbetsmaskiner som opererar med icke-publik laddinfrastruktur får ta del av synergieffekter. Idag finns det endast fem publika vätgasmackar i Sverige (Energigas Sverige, 2024). Hanteringen av vätgas kräver särskild utrustning och avancerade säkerhetssystem för att detektera läckage och andra risker. Därför råder det stor osäkerhet kring vad prisnivån för tankinfrastruktur kommer att vara om den etableras och används i större skala.
- Pris på maskin – Inköpspriset på elarbetsmaskiner påverkas bland annat av batteriets storlek och kapacitet. Även om elmotorer är enklare och billigare att tillverka än förbränningsmotorer, så utgör batteriet en stor kostnadspost. Den intensiva utvecklingen inom batteriteknik och ökad produktion leder till sjunkande priser. Dessutom förväntas skalfördelar inom elfordonsindustrin ytterligare driva ner elkomponentkostnaderna. Trots högre initiala

kostnader kan elmaskiner ha en lägre total ägandekostnad över tid. Detta beror på lägre bränslekostnader och billigare service. Total ägandekostnad varierar dock beroende på faktorer som körsträcka, nyttjandegrad, elpriser och andra lokala förutsättningar.

- Utveckling av batterier - Det läggs globalt mycket stora resurser på att utveckla batteriteknik, både utforska olika teknologier och förbättra prestanda. Flera skiften har redan skett, till exempel från litium jonbatterier baserad på NMC till LPF kemier för personbilar. Liknande skiften påverkar även batterierna för arbetsmaskiner. På lång sikt är det svårt att förutsäga vilka kemier som kommer att dominera samt vilket pris och prestanda som kommer gälla. Att priserna kommer fortsätta nedåt är dock bedömare överens om (IEA, 2024), där vissa förutspår en halvering till år 2026 jämfört med 2023 (Goldman Sachs, 2024).
- Råvaruanvändande – Förutom pris, prestanda och växthusgaser finns det många andra aspekter att beakta när det gäller batterier. Åtgången av naturresurser och batterimineraler samt hållbar produktion och sociala aspekter är också viktiga att ta hänsyn till. Det kan alltså vara värt att undvika onödigt stora batteripackar. Genom direkt elektrifiering, snabbare laddning och batteribyte finns möjligheten att använda mindre batteripack. Detta kan vara en viktig aspekt vid val av laddinfrastruktur för elektrifiering.
- Utbud på fordon – I vissa branscher har elektrifieringen kommit lite längre, medan elektrifierade maskiner är en relativt ny företeelse i andra. Ett begränsat utbud och svårigheten att hitta en maskin som passar den specifika tillämpningen kan vara ett problem när man jämför förbränningsmotoralternativ med elektrifierade maskiner. Dessutom är laddstandarder fortfarande under utveckling, vilket kan innebära att olika maskiner kräver olika laddinfrastruktur.
- Markanvändande vid laddning – Plats för laddning kan ibland kräva mycket utrymme om många fordon behöver ladda samtidigt. Utrymmesbehovet kan dock variera beroende på teknikval. Till exempel kräver elvägar (som ger laddning under drift) och batteribytesstationer (som snabbt ger ett nytt fulladdat batteri) ofta betydligt mindre mark än stationär laddning på en särskild laddplats. Att integrera laddplatser med uppställningsplatser när fordonet inte är i bruk kan vara ett viktigt sätt att begränsa markanvändningen. För elektriska vägfordon utgör hemma- eller depåladdning mer en 90% av det totala laddbehovet.
- Andra aspekter av elektrifierade drivlinor – Jämfört med förbränningsmotorer har elektrifierade drivlinor flera fördelar som påverkar arbetsmiljön för operatörer på en arbetsplats. Exempel på sådana faktorer är minskade emissioner, lägre bullernivåer och högre driftssäkerhet. Till exempel kan en laddstation för ett elektriskt fordon placeras inomhus där människor vistas, vilket inte skulle vara lämpligt för en tankstation för bensin eller diesel.

När det gäller styrmedel för att främja ladd- och tankinfrastruktur kan man tänka sig åtgärder som fokuserar på en eller flera av ovan nämnda aspekter. Exempel på existerande styrmedel inkluderar ekonomiska incitament, regleringar och lagstiftning, satsningar på forskning och innovation samt utbildning och information. Ekonomiska incitament omfattar subventioner och skatteavdrag som erbjuder ekonomiska fördelar för köp av el- och hybridfordon samt för installation av laddinfrastruktur. Dessutom kan koldioxidskatt införas eller höjas på fossila bränslen för att göra dem mindre attraktiva jämfört med förnybara alternativ. Sverige har tidigare haft sådana incitament på personbilar samt bränsle.

Regleringar och lagstiftning spelar också en viktig roll, med strikta utsläppskrav för nya fordon för att minska koldioxidutsläppen och gradvisa förbud mot försäljning av nya bensin- och dieselfordon.

Forskning och innovation är nödvändiga för att driva fram nya teknologier för förnybara drivmedel och energieffektiva fordon, samt hur dessa används i specifika branscher. Detta kan uppnås genom att finansiera forskning och utveckling samt genomföra pilotprojekt för att testa och demonstrera nya

lösningar. Slutligen är utbildning och information viktiga komponenter för att främja omställningen. Detta kan inkludera kampanjer för att informera allmänheten om fördelarna med fossilfria maskiner och hur man kan bidra till omställningen, samt utbildningsprogram för mekaniker och tekniker om underhåll av elektriska maskiner.

Fler styrmedel som är relevanta specifikt för fordon och arbetsmaskiner inom entreprenad, såsom miljözoner och förhöjd fordonsskatt, diskuteras i en rapport framtagen av WSP (Zehaie, Liden, Uppenberg, & Wallström, 2024).

6.3. De viktigaste insikterna

Nedan presenteras en lista på viktigaste insikterna i punktform.

- Det finns en hel del pågående aktivitet inom detta breda område, med många lyckade exempel även om delar fortfarande befinner sig i uppstartsfas. För tillfället är batterilösningar de mest utvecklade, men det finns ett antal olika vägar framåt både vad gäller teknologier och implementering av laddinfrastruktur.
- Elektrifieringen genererar en ökad komplexitet i alla branscherna, med olika utmaningar i olika branscher. Infrastrukturen formar även logistikmöjligheterna och hur en vidare uppskalning skulle se ut, och det ger ökade kunskapskrav. Dessutom introduceras en starkare koppling till energisidan, vilket gör det mer angeläget att optimera belastningen på elnätet exempelvis via smartladdning eller batterilager.
- Flera faktorer är avgörande förutom teknik, som ofta inte är det största hinder. Koppling mot elnäten är nyckelfaktor, med tillgång till energi/effekt; regelverk kan vara hinder. Transformationen drivs via olika inblandade aktörer, och påverkas av efterfrågan av elektrifierade arbetsmaskiner lokalt och globalt. Lärdomar från Norge, men även det svenska exemplet Förskolan Ottfjället visar att man kan påverka via offentliga upphandlingar. Exemplet Slakthuset, med flera, visar hur god befintlig nätanslutning underlättar och tyder på att förenklad regelverk för temporära anslutningar och hantering av övertrasserad maximal effekt skulle kunna påverka. Andra exempel visar att även utan goda anslutningar är det möjligt att elektrifiera, om energilagerlösningar är tillgängliga.
- Det finns behov att agera på det som är redan känt. Styrmedel och regelverk spelar roll, och det är möjligt att ta fram förslag på åtgärder för att främja och underlätta, exempelvis kring riktlinjer för eventuella bidrag, gå via offentliga beställare, ta fram/uppdatera regelverk kring säkerhet, batterier, utbildning, etc. Det är viktigt att man har förutsägbara och långsiktiga krav för att få aktörerna att våga investera. Exempel på konkreta sådana åtgärder är möjlig sänkning av kravet på minsta nettoeffekt vid definitionen av ”miljöarbetsmaskiner” vid stödåtgärder, tydligare regler för transport av batterier, tydliggöra kopplingar mot transportsektorer som där elektrifieringen utvecklas parallellt samt energisektorn som också genomgår en förändring.
- Datainsamling och synkronisering med andra sektorer skulle kunna underlätta en ökad elektrifiering. Det saknas bra data på hur elektrifieringsgraden ser ut inom olika branscher och det är det är tyvärr ej alltid väldokumenterat vilka hinder man har mött i de olika projekten när man inte har löst dem. Det behövs också oberoende beräkningsmodeller kring elektrifieringslösningarnas faktiska elbehov och batterilivslängd som valideras mot verkliga data. Mer forskning kring detta skulle behövas.

Referenser

Agromec. (2024). *Elektrische tractor – Agromec 700 Vario Electric*. Hämtat från https://www.fendtfarming.nl/producten/elektrische-tractor/

AirForestry. (den 20 09 2024). *Air Forestry*. Hämtat från https://www.airforestry.com/

Amundsen, A. (2021). *Tiltakskatalog for transport og miljö*. Hämtat från Reduserte utslipp fra anleggsmaskiner: https://www.tiltak.no/c-miljoeteknologi/c1-drivstoff-og-effektivisering/reduserte-utslipp-fra-anleggsmaskiner/?highlight=Anleggsmaskiner den 10 06 2024

Anläggnings världen. (den 16 02 2024). *Elektriska ”Elsa” på finjobb i Stockholm*. Hämtat från https://anlaggningsvarlden.se/elektriska-elsa-pa-finjobb-i-stockholm/

Arne Nåbo, M. A. (2024). *Battery-Swapping for Heavy Duty Vehicles: A Feasibility Study on Up-Scaling in Sweden.* VTI.

Bern, L. (2024). *Elektrifierade Bygg- och Anläggningsplatser II (Electric Worksite).* Hämtat från https://www.electricitygoteborg.se/sites/default/files/2024-04/electric-worksite-ii-slutrapport-med-bilagor.pdf

Björk, L. (2022). *Konsekvensanalys av förslag om att införa ett arbetsmaskinregister.* Göteborg: VTI.

Byggnyheter. (den 19 3 2024). *Volvo, Skanska och Hitachi Energys samarbete för positiv klimatomställning*. Hämtat från https://www.byggnyheter.se/20240319/30270/volvo-skanska-och-hitachi-energys-samarbete-positiv-klimatomstallning

Ecoloop. (2020). *Ecoloop, Electrifiering av tätorternas masshantering*. Hämtat från https://www.ecoloop.se/elektrifiering-masshantering/ den 10 06 2024

Ekonomifakta - El fakta. (den 02 08 2024). *Elproduktion med fossila bränslen - internationellt*. Hämtat från https://www.ekonomifakta.se/sakomraden/elfakta/energiproduktion/elproduktion-med-fossila-branslen-internationellt_1212946.html den 09 10 2024

Energigas Sverige. (2024). *Tanka Vätgas*. Hämtat från https://www.energigas.se/fakta-om-gas/vatgas/tanka-vatgas/

Engström, J., Kihlstedt, A., Pettersson, O., Jacobsson, E., Björnsson, L.-H., Jansson, J., & Andersson, H. S. (2024). *Modulärt batteribytessystem för arbetsmaskiner – slutrapport.* RISE Rapport ; 2023:104. Hämtat från https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1879089/FULLTEXT01.pdf

Epiroc. (2024). *Innovation och Teknik - Nollutsläpp*. Hämtat från https://www.epiroc.com/sv-se/innovation-and-technology/zero-emission den 10 06 2024

Equipment Journal. (den 23 06 2022). *Hyundai to introduce electric and hydrogen excavators in 2023 and 2026*. Hämtat från https://www.equipmentjournal.com/construction-news/hyundai-to-introduce-electric-and-hydrogen-excavators-in-2023-and-2026/ den 10 06 2024

Fusion Energy. (2024). *Fusion energy Powerbox*. Hämtat från https://fusion-energy.eu/#powerbox den 05 06 2024

Goldman Sachs. (den 7 10 2024). *Electric vehicle battery prices are expected to fall almost 50% by 2026*. Hämtat från https://www.goldmansachs.com/insights/articles/electric-vehicle-battery-prices-are-expected-to-fall-almost-50-percent-by-2025

Huddig. (2024). *Huddig 1370T*. Hämtat från https://www.huddig.com/sv/produkter/gravlastare/huddig-1370t/#brandtitle den 2024 06 10

Husqvarna. (2024). *Husqvarna Generatorer*. Hämtat från https://www.husqvarna.com/se/generatorer/ den 10 06 2024

I skogen. (den 11 11 2021). *AirForestry satsar på skogsgallring med drönare*. Hämtat från https://iskogen.se/skogsbruk/airforestry-skogsgallring-med-dronare/ den 10 09 2024

IEA. (2024). *Global EV Outlook 2024; Moving towards increased affordability.* International Energy Agency. Hämtat från https://iea.blob.core.windows.net/assets/a9e3544b-0b12-4e15-b407-65f5c8ce1b5f/GlobalEVOutlook2024.pdf

IEA. (2024). *Global Hydrogen Review 2024*. Hämtat från https://www.iea.org/

Komatsu. (2023). *Komatsu Newsroom*. Hämtat från https://www.komatsu.jp/en/newsroom/2023/20230308 den 12 06 2024

Komatsu. (2024). *Hydrogen in our future, Development of a medium-sized hydraulic excavator powered by a hydrogen fuel-cell*. Hämtat från https://www.komatsu.jp/en/aboutus/brandcommunication/hydrogen-fuel-cell 2024

Malwa. (2024). *Om Malwa*. Hämtat från https://malwaforest.com/om-malwa/ den 03 06 2024

Maskinentreprenören. (den 19 03 2024). *Skanska gräver med el från vätgas*. Hämtat från https://www.maskinentreprenoren.se/skanska-graver-med-el-fran-vatgas

Mining Magazine. (den 24 10 2019). *Boliden doubles down on electrification*. Hämtat från https://www.miningmagazine.com/fleets/news/1374272/boliden-doubles-electrification den 04 06 2024

MSB. (2024). *Transport av litiumbatterier*. Hämtat från https://www.msb.se/sv/amnesomraden/skydd-mot-olyckor-och-farliga-amnen/farligt-gods/litiumbatterier/

Naturvårdsverket. (2024). *Arbetsmaskiner, utsläpp av växthusgaser*. Hämtat från https://www.naturvardsverket.se/data-och-statistik/klimat/vaxthusgaser-utslapp-fran-arbetsmaskiner/

Nio. (den 22 02 2024). *NIO Power Grid Service använder Power Swap-stationer för att öka nätets motståndskraft och tillförlitlighet*. Hämtat från https://www.nio.com/sv_SE/news/202402220000

Port of Los Angeles. (u.d.). *Green Omni Terminal Project*. Hämtat från https://kentico.portoflosangeles.org/getmedia/5d9a2350-9887-41ce-813a-8c51f37c3e53/pasha-fact-sheet

Rental Group. (2024). *Rental Group inngår avtaler med store produsenter av nullutslippsmaskiner*. Hämtat från https://rentalgroup.no/rental-group-inngar-avtaler-med-store-produsenter-av-nullutslippsmaskiner/

RISE. (2024). *Projekt: Modulärt batteribytessystem för fossilfria eldrivna arbetsmaskiner*. Hämtat från https://www.ri.se/sv/vad-vi-gor/projekt/modulart-batteribytessystem-for-fossilfria-eldrivna-arbetsmaskiner den 04 06 2024

Sandvik. (2024). *Equipment, Battery electric loaders*. Hämtat från LH518iB: https://www.rocktechnology.sandvik/en/products/equipment/loaders/lh518ib-battery-electric-loader/ den 10 06 2024

Scania. (den 11 06 2024). *Scania etablerar bolag för laddlösningar*. Hämtat från https://www.scania.com/se/sv/home/newsroom/press-releases/press-release-detail-page.html/4845306-scania-etablerar-bolag-for-laddlosningar

Skanska. (2024). *Skanska projekt ABCD-förskola, Ottfjällets förskola, Östersund*. Hämtat från https://www.skanska.se/vart-erbjudande/vara-projekt/276706/ABCDforskola%2C-Ottfjallets-forskola%2C-Ostersund den 10 06 2024

Staad. (2024). *Electric earth movers and escavators*. Hämtat från https://www.staad-group.com/electric/electric-machines/ den 10 06 2024

Stockholms stad. (den 15 02 2024). *Byggarbetsplats på söder siktar mot nollutsläpp*. Hämtat från Pressmeddelande: https://via.tt.se/pressmeddelande/3418072/byggarbetsplats-pa-soder-siktar-mot-nollutslapp?publisherId=1213538&lang=sv den 09 06 2024

Svensk Åkeritidning. (den 22 03 2024). *Göteborgs Hamn pilottestar vätgasgenerator*. Hämtat från https://www.akeri.se/sv/nyheter/goteborgs-hamn-pilottestar-vatgasgenerator den 04 06 2024

Tidningen Näringslivet. (den 3 4 2024). *Elgrävmaskin laddas med vätgasproducerad el: ”Det fungerar”*. Hämtat från https://www.tn.se/naringsliv/36587/elgravmaskin-laddas-med-vatgasproducerad-el-det-fungerar/

Tong, Z.-m., Miao, J.-z., LI, Y.-s., Tong, S.-g., Zhang, Q., & Tan, G.-r. (2021). Development of electric construction machinery in China: a review of key technologies and future directions. *Applied Physics & Engineering*, 22(4):245-264.

Trafikanalys. (2023). *Arbetsmaskiner – hur syns de i fordonsstatistiken?* Hämtat från https://www.trafa.se/vagtrafik/arbetsmaskiner--hur-syns-de-i-statistiken-13913/ den 12 06 2024

Uppsala Universitet. (den 22 02 2023). *Gallring av skog kan göras med drönare*. Hämtat från https://www.uu.se/nyheter/2023/2023-02-22-gallring-av-skog-kan-goras-med-dronare den 10 09 2024

Vattenfall. (2021). *Mobilt batterilager till byggbranschen*. Hämtat från https://www.vattenfall.se/foretag/vara-tjanster/elkraft-som-tjanst/aktuellt/mobilt-batterilager-till-byggbranschen/ den 03 06 2024

Vattenfall. (2024a). *Mobilt batterilager stöttar i elektrifieringen av byggarbetsplatser*. Hämtat från Eneryplaza Vattenfall: https://energyplaza.vattenfall.se/blogg/mobilt-batterilager-stottar-i-elektrifieringen-av-byggarbetsplatser den 01 06 2024

Vinnova. (den 07 05 2020). *Projektdatabas*. Hämtat från Electric Farm: https://www.vinnova.se/p/electric-farm/ den 07 06 2024

Volvo CE. (den 5 12 2022). *Volvo CE boosts its electrification transformation with investment in Dutch manufacturer Limach*. Hämtat från https://www.volvoce.com/global/en/news-and-events/news-and-stories/2022/volvo-ce-boosts-its-electrification-transformation-with-investment-in-dutch-manufacturer-limach/ den 10 06 2024

Volvo CE. (2024). *Eldrivna arbetsmaskiner för alla branscher*. Hämtat från https://www.volvoce.com/sverige/sv-se/products/electric-machines/ den 10 06 2024

Volvo CE. (den 11 03 2024a). *Pressmeddelande "When electric meets horsepower"*. Hämtat från https://www.volvoce.com/europe/en/about-us/news/2024/when-electric-meets-horsepower/ den 07 06 2024

Volvo CE. (2024b). *Products, Power unit Volvo PU40*. Hämtat från https://www.volvoce.com/-/media/volvoce/global/products/electric-machines/power-unit/pu40/brochure/flyer_volvo_pu40_en_21_20062961_a.pdf?v=j5ttPw den 10 06 2024

Volvo CE. (2024c). *Volvo CE News & Events*. Hämtat från Volvo CE partners on Sweden's largest fossilfree worksite: https://www.volvoce.com/global/en/news-and-events/news-and-stories/2022/volvo-ce-partners-on-swedens-largest-fossil-free-worksite/ den 10 06 2024

Volvo CE. (2024d). *Charging time for electric compact machines*. Hämtat från https://www.volvoce.com/europe/en/electric-construction/charging-compact-construction-equipment/ den 18 10 2024

Volvo CE. (2024e). *Charging Large Construction Equipment*. Hämtat från https://www.volvoce.com/europe/en/electric-construction/charging-large-construction-equipment/ den 18 10 2024

Volvo Group. (2024). *Report on the fourth quarter and full year 2023.*

Webasto. (2024). *Successful Electrification of Doosan Excavators*. Hämtat från https://www.webasto.com/en-int/electrification/reference-stories/case-study-ece.html den 10 06 2024

Zehaie, F., Liden, L., Uppenberg, S., & Wallström, J. (2024). *Omvärldsanalys av arbetsmaskiner och fordon inom entreprenad.* WSP. Hämtat från https://bransch.trafikverket.se/contentassets/bd04374d86074cb0aa46a7f540338747/omvarldsanalys-av-arbetsmaskiner-och-fordon-inom-entreprenad---slutrapport.pdf

VTI är ett oberoende och internationellt framstående forskningsinstitut inom transportsektorn. Vi bedriver forskning och utveckling för att förbättra kunskapen om infrastruktur, trafik och transporter. Genom vårt arbete bidrar vi till att nå Sveriges transportpolitiska mål för tillgänglighet, säkerhet, miljö och hälsa.

Vi utför forskning på uppdrag inom alla transportslag och arbetar i en tvärvetenskaplig organisation. Den kunskap vi genererar ger viktig information till aktörer inom transportsektorn och används ofta direkt i nationell och internationell transportpolitik.

Utöver forskning erbjuder vi utredningar, rådgivning samt olika mät- och provningstjänster. På VTI har vi avancerad forskningsutrustning av olika slag och världsledande körsimulatorer. Vi har även ackrediterade laboratorier för vägmaterial och krocksäkerhetstestning.

Transportbiblioteket vid VTI är en nationell resurs som samlar in och sprider information om svensk transportforskning. Biblioteket ger stöd och vägledning till alla som söker information inom området vilket inkluderar lån- och kopieservice. Exempel på uppdrag är informationssökningar, handledning i referenshantering och skräddarsydd service till myndigheter och organisationer.

I Sverige samarbetar VTI med universitet och högskolor som bedriver relaterad forskning och utbildning. Vi deltar regelbundet i internationella forskningsprojekt, främst i Europa, och är aktiva inom internationella nätverk och allianser. Vi är cirka 240 medarbetare och finns i Linköping, Stockholm, Göteborg och Lund.

vti

Statens väg- och transportforskningsinstitut • www.vti.se • vti@vti.se • +46 (0)13–20 40 00

Mikael Damkier/Mostphotos.com