



CHALMERS



Elektrifiering av arbetsmaskiner i berg-tunnlar

En kostnadsnyttoanalys för arbetsmaskiner i utlastningsfasen av arbete i bergtunnel

Kandidatarbete vid institutionen för Mekanik och Maritima vetenskaper

Anna Johansson
Alexander Nolfalk
Linnéa Ålund

INSTITUTIONEN FÖR MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2025
www.chalmers.se

KANDIDATARBETE INOM GLOBALA SYSTEM, MASKINTEKNIK OCH
SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK

Elektrifiering av arbetsmaskiner i tunnelbyggen

En kostnadsnyttoanalys för arbetsmaskiner i utlastningsfasen av
arbete i bergtunnel

Anna Johansson
Alexander Nolfalk
Linnéa Ålund



CHALMERS

Institutionen för Mekanik och Maritima Vetenskaper
Avdelningen för Transport, energi och miljö
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2025

Elektrifiering av arbetsmaskiner i tunnelbyggen
En kostnadsnyttoanalys för arbetsmaskiner i utlastningsfasen av arbete i bergtunnel
Anna Johansson
Alexander Nolfalk
Linnéa Ålund

© Anna Johansson, Alexander Nolfalk, Linnéa Ålund,
2025.

Handledare: Joel Löfving, Mekanik och maritima vetenskaper
Examinator: Selma Brynolf, Mekanik och maritima vetenskaper

Kandidatarbete 2025
Institutionen för Mekanik och Maritima Vetenskaper
Chalmers Tekniska Högskola
SE-412 96 Göteborg
Telefon +46 31 772 1000

Omslagsbild: Arbetsmaskiner i tunnelbyggnation (Skapad med ChatGPT (OpenAI)
från prompten "Elektrifiering av byggmaskiner under jord", 2025)

Typsatt i L^AT_EX
Göteborg 2025

Sammanfattning

Projektet har undersökt hur en övergång från dieseldrivna till eldrivna arbetsmaskiner under utlastningsfasen i tunnelbyggnation påverkar kostnader samt samhällsnyttor, såsom exempelvis minskade utsläpp och förbättrad arbetsmiljö. Syftet med studien är att öka förståelsen för vilka hinder, kostnader och möjligheter som är förknippade med elektrifiering av arbetsmaskiner inom utlastningsfasen av tunnelbyggandet. Detta för att bidra med insikter som kan bidra till framtida utformning av utlastningsfasen.

Projektet baseras på en nytto-kostnadsanalys där både ekonomiska och miljömässiga aspekter, såsom minskade utsläpp av luftföroreningar och växthusgaser, har kvantifierats och värderats. Denna analys syftar till att undersöka hur kostnadsbildningen förändras vid en övergång från diesel- till eldrift. Datan som har använts har utgått från Västlänken-projektet, i syfte att skapa ett representativt fall för utlastningsarbete i tunnelmiljö. Utöver detta genomfördes intervjuer med entreprenörer verksamma inom tunnelprojekt för att identifiera praktiska hinder med en övergång till eldrift, samt fånga entreprenörernas syn på de förändringar som framkom i kostnads-nyttoanalysen.

Resultatet visar att elektrifierade arbetsmaskiner kan bli kostnadseffektiva över tid jämfört med dieseldrivna alternativ. Den största kostnaden över livscykelns som identifierades var den initiala inköpkostnaden av maskinen samt drivmedelkostnaden. Flera fördelar med eldrift identifierades, bland annat minskade utsläpp och förbättrad arbetsmiljö. Samtidigt identifierades flera utmaningar som gör batteridrivna maskiner svåra att använda i dagsläget, exempelvis höga initiala investeringskostnader i både maskiner och laddinfrastruktur, inte tillräcklig prestanda på dagens eldrivna maskiner samt en förhöjd brandrisk vid användning av batterier i tunnelmiljöer.

Flera olika osäkerheter identifierades i kalkylen såsom exempelvis framtida batteripris, drivmedelskostnader samt bidrag och subventioner. Dessa analyserades men för att mer exakt kunna bedöma den faktiska kostnaden och nyttan av elektrifiering krävs vidare studier inom området.

Nyckelord: Tunnelbyggnation, Elektrifiering, Kostnads-nyttoanalys, skadekostnader, arbetsmaskiner.

Abstract

In this project, a transition from diesel-powered to electric-powered work machines during the unloading phase of a tunnel construction has been investigated: Both how costs are effected as well as societal benefits, such as reduced emissions and improved working environment. The aim of the study is to increase the understanding of the difficulties, costs and opportunities associated with the electrification of work machines within the unloading phase of a tunnel construction, and to contribute with insights that can help the future design of this phase when building a tunnel.

The project is based on a cost-benefit analysis where both economic and environmental aspects - such as reduced emissions of air pollutants and greenhouse gases - have been quantified and assessed. This analysis aims to investigate how the cost changes when transitioning from diesel to an electric operation. The data used has been based on the Västlänken project, with the aim of creating a representative case for work surrounding unloading in a tunnel environment. In addition, interviews were conducted with contractors working on tunnel projects to identify practical obstacles surrounding a transition to electric power, and to capture the contractors' views on the changes that emerged in the cost-benefit analysis.

The result shows that electrified work machines can become cost-effective over time compared to diesel-powered alternatives. The largest identified cost over the machine's life cycle was the cost of the initial purchase of the machine and the cost of fuel. Several advantages of electric power were identified, including reduced emissions and an improved working environment. At the same time, several challenges were identified that make battery-powered machines difficult to use in the present, such as high initial investment costs in both machines and charging infrastructure, insufficient performance of today's electric machines and an increased fire risk when using batteries in tunnel environments.

Several different uncertainties were identified in the calculation, such as future battery prices, fuel costs and grants and subsidies. These were analyzed, but in order to more accurately assess the costs and benefits of electrification, further studies in the area are required.

Keywords: Tunnel construction, Electrification, Cost-benefit analysis, External costs, Construction equipment.

Förord

Denna rapport presenterar resultatet av kandidatarbete som gjordes på institutionen för Mekanik och Maritima vetenskaper vid Chalmers Tekniska Högskola under våren 2025.

Författarnas tack

Vi vill rikta ett stort tack till vår handledare Joel Löfving för det stöd och vägledning vi fått under arbetets gång och vår examinator Selma Brynolf för förtroendet till oss i detta arbetet. Vi vill också tacka Magnus Lindgren och Andreas Johansson för värdefull hjälp och konstruktiv feedback. Slutligen vill vi tacka samtliga andra aktörer som bidragit med data och deltagit i intervjuer.

A. Johansson, A. Nolfalk, L. Ålund, Göteborg, maj, 2025



Innehåll

Figurer	1
Tabeller	1
1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Tidigare studier	2
1.3 Syfte	4
1.4 Frågeställning	4
1.5 Avgränsningar	4
2 Teori	7
2.1 Byggarbetsplats i bergtunnel	7
2.1.1 Cykler för arbete	7
2.1.2 Hjullastare	8
2.1.3 Lastbilar	9
2.1.4 Miljökrav på arbetsmaskiner	9
2.2 Kostnader	9
2.2.1 Investeringskostnader	10
2.2.2 Löpande kostnader	11
2.3 Nyttor, besparingar och risker	13
2.3.1 Minskade utsläpp	13
2.3.2 Minskade ventilationskostnader vid eldrift	14
2.3.3 Lägre bullernivåer	14
2.3.4 Ökad brandrisk	14
2.4 Existerande regelverk	14
2.4.1 Krav på ventilation	15
2.4.2 Svensk koldioxidskatt och energiskatt	15
3 Metod	17
3.1 Kostnads-nyttoanalys	17
3.2 Beräkningar och uppskattade kostnader	19
3.2.1 Uppskattning av inköpskostnad för eldriven hjullastare	19
3.2.2 Uppskattning av drift- och servicekostnad	19
3.2.3 Beräkning och värdering av utsläpp	20
3.2.4 Uppskattning av daglig drifttid	21
3.2.5 Uppskattning av avskrivningstid	21

3.2.6	Skillnader i pris över tid	21
3.2.7	Övriga antaganden	21
3.3	Intervjuer	22
4	Resultat	23
4.1	Kostnadsnyttoanalys	23
4.2	Känslighetsanalys av kalkylen	27
4.2.1	Utveckling av batterier i elektrifierade arbetsfordon	28
4.2.2	Bidrag för eldrivna maskiner	28
4.2.3	Inköpspris för beräknad hjullastare	29
4.2.4	Framtida drivmedelpriser	30
4.2.5	Känslighetsanalys diskonteringsränta	32
4.2.6	Snabbladdning	33
4.3	Ej beräkningsbara effekter	35
4.3.1	Arbetsmiljö och hälsorisker	35
4.3.2	Brandrisk	35
4.3.3	Andrahandsmarknad	36
4.3.4	Övriga effekter	36
4.4	Samtida syn på elektrifiering av arbetsmaskiner	37
4.4.1	Ekonomiska hinder	37
4.4.2	Tekniska hinder	38
4.4.3	Fördelar med elektrifiering av arbetsmaskiner	39
5	Diskussion	41
5.1	Ekonomiska förutsättningar och osäkerheter	41
5.2	Teknikens begränsningar och möjligheter	43
5.3	Miljömässiga och sociala aspekter	44
5.4	Osäkerheter och framtida utveckling	45
5.5	Begränsningar i analysen	46
5.6	Vidare studier	47
6	Slutsats	49
	Litteraturförteckning	54
A	Appendix A: Beräkning kostnader kostnadsnyttoanalys	I
B	Appendix B: Tematisk sammanställning av intervjuer	III

1

Inledning

1.1 Bakgrund

I en värld som blir allt mer sammankopplad är en effektiv transportinfrastruktur av stor betydelse. I Sverige pågår just nu flera storskaliga anläggningsprojekt i syfte att skapa mer effektiva transportsträckor, där Västlänken i Göteborg utgör ett aktuellt exempel. Dessa projekt genomförs till stor del med dieseldrivna arbetsmaskiner som transporterar ut material efter sprängning och som bidrar till klimatpåverkan. År 2023 stod arbetsmaskiner i Sverige för cirka 2,5 % av de totala växthusgasutsläppen (Naturvårdsverket, 2024). Idag drivs maskiner till stor del med biodrivmedel, men Trafikverket arbetar aktivt med att styra mot en ökad användning av nollutsläppsfordon (2024a) - fordon som inte släpper ut koldioxid under drift - genom att ställa krav vid upphandlingar. Detta för att uppnå sitt mål om nettonollutsläpp i alla deras projekt till 2040 (2023a). Än så länge finns inga specifika kravnivåer för tyngre fordon och maskiner, men dessa förväntas kompletteras framöver. Mer generellt har bygg- och anläggningssektorn i Sverige har satt upp mål om att minska utsläppen med 50 % till år 2030, med målet att uppnå nettonollutsläpp till 2045 och därmed bidra till Sveriges övergripande klimatmål (Trafikverket, 2023b).

I slutna miljöer, såsom tunnlar, blir utsläppen från dieseldrivna arbetsfordon särskilt problematiska. Förutom att bidra till växthusgasutsläpp leder förbränningen av diesel till höga koncentrationer av luftföroreningar, bland annat kväveoxid och partiklar, vilket skapar stora hälsorisker för de som arbetar i tunnelmiljön (Taxell och Santonen, 2016). I reglerna för arbetsplatsens utformning (AFS 2023:14) framgår det att dieselavgaser klassificeras som cancerframkallande samt att EU har fastställt ett bindande gränsvärde, vilket innebär en högsta tillåtna halt som inte får överskridas. Därutöver ska ett ej ännu bestämt gränsvärde för dieselavgaser specifikt vid gruvdrift och tunnelbygge börja gälla från den 21 februari 2026. Detta innebär att det kommer att bli dyrare att använda bränsledrivna maskiner i tunnlar.

För att minska både arbetsmiljörisker och klimatpåverkan, samt nå branschens uppsatta mål, har elektrifiering av arbetsmaskiner lyfts fram som en viktig lösning. Redan i dag är flera olika arbetsmoment som utförs i arbetet i tunnel - såsom borrhning och injektering - elektrifierade (Johansson m. fl., 2021). Samtidigt utförs det mest energikrävande momentet, som är utlastningsfasen då det sprängda bergmaterialet lastas och transporteras ut ur tunneln, fortfarande till största del med dieseldrivna maskiner. Enligt Yang m. fl. (2024) bidrar en övergång från dieseldrivna till eldrivna

maskiner inte bara till minskade utsläpp av växthusgaser och förbättrad luftkvalitet på arbetsplatsen, utan hade även kunnat innebära lägre driftskostnader i form av minskade bränslekostnader och lägre servicekostnader. Dessutom kan arbetsmiljön förbättras ytterligare eftersom buller och vibrationer minskar i en elektrifierad maskinpark.

Det har dock identifierats flera aspekter som försvårar elektrifiering av arbetsmaskiner i tunnelprojekt. De aspekter som främst pekats ut är att initialkostnaden för att införskaffa elektrifierade maskiner är hög, och det blir en eventuell minskad produktivitet som följd av behov av att ladda under arbetstid (Käck och Jansson, 2024). Dessutom förändras brandrisken vid en övergång till batterifordon vilket kräver extra försiktighet i tunnelmiljö (Heger O m. fl., 2023). Samtidigt innebär elektrifieringen en systemomställning då nuvarande arbetsmetoder behöver förändras för att möjliggöra användandet av eldrivna fordon (Trafikverket, 2024b). Detta skapar ytterligare tekniska och ekonomiska hinder i en fungerande arbetsprocess.

1.2 Tidigare studier

Det finns flera olika studier och pilotprojekt som har undersökt elektrifiering av arbetsmaskiner i olika miljöer.

Electric Worksite, eller E-worksite, är ett nyligen avslutat projekt mellan 13 olika aktörer som samverkat för att undersöka elektrifierade arbetsmaskiner i spannet 3,5-30 ton, både batteridrivna och kabelanslutna tekniker undersöktes. (Electricity, u. å). Projektet visade att elektrifiering kräver framförhållning, planering och flexibilitet, särskilt för att säkerställa energiförsörjning och hantera praktiska utmaningar såsom kabelhantering. Studien betonade även att eldrivna maskiner har kapacitet att prestera i nivå med dieseldrivna maskiner. I studien undersöktes inte maskiner som specifikt används i tunnelmiljö samt inte den ekonomiska aspekten av omställningen.

Flera andra studier har undersökt utmaningarna och kostnaderna vid elektrifiering av arbetsmaskiner. Statens vägmil- och transportforskningsinstitut har publicerat en rapport om utmaningar och det aktuella läget för elektrifierade arbetsmaskiner (Käck och Jansson, 2024). År (2023) utförde SWECO en studie som kartlade kostnaderna vid användning av olika drivmedel. Studien utförde en analys av total ägandekostnad för en grävmaskin på 12 ton och visade att en övergång från diesel till el i ett vägprojekt medförde en kostnadsökning på 24 %. Detta berodde främst på antaganden om högre inköpsvärde - motsvarande 2,5 gånger inköpspriset av en dieselmaskinens - samt kostnader för batteribyten efter fem år som beräknades till 40% av inköpsvärdet och nödvändiga investeringar i laddinfrastruktur. Samtidigt som den totala kostnaden ökade visade studien att en omställning till eldrift kan driva ner bränslekostnaderna med 55 % om man jämför med HVO100.

Utöver bredare studier om elektrifiering av anläggningsprojekt finns mer specifika

fallstudier som fokuserar på tunnelmiljöer. En sådan studie är *Application and configuration analysis of electric muck transfer equipment in plateau railway tunnel: a case study in southwest China*; en studie från 2024 som undersöker och jämför elektriska arbetsmaskiner, bland annat hjullastare i ett tunnelprojekt på hög höjd i sydvästra Kina. Detta görs utifrån ekonomi-, klimat- och arbetsmiljöaspekter. Rapporten lägger stort fokus på de tekniska utmaningarna som tillkommer, bland annat problemet med den låga syrebristen på hög höjd som återkommande lyfts fram genom hela texten. Ett centralt resultat i studien är hur de ekonomiska aspekterna påverkas vid övergången till elektriska maskiner. Studien jämförde kostnaderna för el- och dieseldrivna maskiner med fokus på den initiala investeringskostnaden samt de löpande kostnaderna för drivmedel. Resultatet visade att den elektriska hjullastaren hade en initial investeringskostnad som var ca 50% högre jämfört med motsvarande dieseldrivna maskiner, men samtidigt var energikostnader 40 % lägre. Analysen kom fram till att eldrift kan ge en total besparing på ca 20 % (Yang m. fl., 2024). Studien visade också förbättrad luftkvalitet, minskat ventilationsbehov och bullernivåer som var 20-30 dB lägre vid eldrift. Utmaningarna identifierades främst inom laddinfrastruktur och batterikapacitet vilket påverkade maskinens drifttid negativt. Vidare belyste rapporten att utvecklingen av elektriska maskiner i fortfarande befinner sig i ett tidigt skede, vilket medfört att utbudet av elektriska maskiner på marknaden fortfarande är begränsat.

I Sverige har förstudien Hållbar TunnEL genomförts där Trafikverket tillsammans med Epiroc, Svensk kärnbränslehantering AB samt Ecoloop identifierat hinder, möjligheter och utvecklingsbehov för att helt kunna elektrifiera tunneldrivningsprojekt (Johansson m. fl., 2021). Resultatet av studien visar att elektrifiering har stor potential att minska klimatbelastningen och förbättra arbetsmiljön vid tunnelarbeten. Vidare beskrivs att utlastningsmomentet är det moment som drar mest energi samtidigt som det är minst elektrifierat i dagens projekt. Elektrifiering av utlastningsmomentet kan därför minska utsläppen av fossil koldioxid med upp till 50%, och de lokala hälsoskadliga emissionerna kan reduceras med mer än 60% (Johansson m. fl., 2021).

Trots flertal olika studier om elektrifiering av arbetsmaskiner, finns det få som specifikt fokuserar på tunnelarbeten. Studierna använder sig av olika metodsatser, där både fältdata och teori legat till grund för resultatet. Trots detta saknas analyser som väger de ekonomiska kostnaderna för omställningen till eldrift mot de förväntade miljö- och hälsofördelarna, vilket försvårar en övergripande bedömning av den långsiktiga nyttan med elektrifieringen. För att fatta välgrundade beslut om elektrifiering i tunnelbyggen behövs därmed en jämförelse kring hur externa effekter ställer sig mot kostnader och hur de skiljer sig åt vid dieseldriven- respektive elektrifierad arbetsprocess.

Ett sätt att undersöka hur de ökade kostnaderna kan ställas mot de potentiella nyttorna är med hjälp av en kostnads-nyttoanalys (från engelskans cost-benefit analysis). Där kan kostnaderna, både direkta såsom inköps- och drivkostnader och indirekta - exempelvis att utsläpp har en kostnad för samhället - värderas och kvantifieras.

ras. Samtidigt kan intervjuer bidra till förståelse om praktiska hinder i branschen. Särskilt intressant är att göra en sådan studie ur ett svenskt perspektiv och de förhållandena som råder här. Således kan analysen bidra till ett ökat beslutsunderlag för byggbranschen och myndigheterna för framtida tunnelarbeten.

1.3 Syfte

Syftet med detta projekt är att öka förståelsen för möjligheterna med att ställa om till eldrivna arbetsmaskiner i tunnelbyggen i Sverige. Detta görs genom att undersöka hur kostnader, produktivitet, luftkvalitet och utsläpp påverkas under utlastningsfasen i ett tunnelprojekt vid eldrift jämfört med dieseldrift. Analysen utgår från Västlänken och baseras på intervjuer med ansvariga inom tunnelbyggnation för att fånga praktiska erfarenheter, samt en kostnads-nyttanalys där miljö- och hälsoeffekter kvantifieras och värderas, och ställs mot kostnaderna. Målet är att belysa skillnader mellan el- och dieseldrivna arbetsmaskiner i tunnelbyggen och därigenom bidra med kunskap som kan underlätta utformningen av utlastningsfasen i tunnelprojekt i framtiden.

1.4 Frågeställning

För att undersöka syftet närmare analyseras följande huvud- och delfrågeställningar.

Huvudfrågeställning:

- Hur påverkas kostnader, miljöeffekter, tekniska utmaningar och potentiella nyttor vid en övergång från dieseldrivna till elektrifierade byggmaskiner vid utlastningsfasen i tunnelprojekt?

Delfrågeställningar:

- Hur skiljer sig driftkostnader och investeringskostnader för diesel- och eldrivna arbetsmaskiner?
- Hur påverkas samhällskostnader av klimatpåverkan och luftföroreningar vid användning av eldrivna jämfört med dieseldrivna maskiner?
- Vilka tekniska och praktiska utmaningar finns vid övergång till eldrivna maskiner vid utlastningsfasen?

1.5 Avgränsningar

Analysen omfattar en tidsperiod motsvarande arbetsmaskinernas förväntade livslängd och fokuserar på maskiner som används under utlastningsfasen vid arbete i bergtunnel. En elektrisk samt dieseldriven hjullastare och lastbil jämförs - alltså inte hela maskinparken som används vid tunnelbyggnation. Övriga parametrar kopplade till tunnelarbetet, såsom exempelvis storlek och kostnad för ventilationssystem,

uppskattas baserat på erfarenheter från Västlänken-projektet.

För faktorer där data inte kan hämtas direkt från Västlänken används egna uppskattningar baserade på insamlad information. Alla antaganden och uppskattningar presenteras i rapporten. Vidare antas att de kringliggande system och arbetssätt som används idag även gäller under hela analysperioden. De elektriska maskinerna antas ha samma arbetskapacitet som dagens dieseldrivna modeller, och vid dimensioneringen antas hjullastaren kunna arbeta en hel arbetsdag utan behov av laddning. Tunnelbygge är en trång miljö och därför antas användning av endast lastbilar utan släp i rapporten.

I kostnad-nyttoanalysen utesluts vissa effekter. Exempelvis antas att det finns tillräcklig eleffekt och kapacitet på platsen för att möjliggöra elektrifiering. Även de aspekter som är likvärdiga för de två fallen frånses i analysen.

De klimatberäkningar som genomförs i projektet tar inte hänsyn till utsläpp vid tillverkning av arbetsfordon utan endast vid drift. Projektet inkluderar dock utsläpp vid produktion av el och HVO100 för att belysa skillnader i olika drivmedelsslag. De emissioner som studeras är koldioxid som orsakar klimatpåverkan samt kväveoxid och partiklar som orsakar lokala hälsorisker. I analysen ingår inte spränggaser då dessa är likvärdiga oavsett vad maskinen drivs på.

Värdet på maskinerna på en eventuell andrahandsmarknad tas ej med i analysen. Lönekostnader tas inte med i kalkylen.

2

Teori

För att undersöka hur elektrifiering av arbetsmaskiner i utlastningsfasen av ett tunnelprojekt skiljer sig från användning av dieseldrivna maskiner, analyseras ett antal kriterier. I teorin presenteras inledningsvis hur arbetet i en bergtunnel vanligtvis genomförs, vilka maskiner som används i dagsläget samt deras elektriska motsvarigheter. Därefter redovisas kostnader kopplade till respektive maskinpar, samt de nyttor, besparingar och risker som en elektrifiering kan medföra vilket ligger till grund för en kostnad-nyttö analys. Även emissionsfaktorer för utsläpp av koldioxid, kvävedioxid samt partiklar redovisas. Avslutningsvis presenteras de regelverk och riktlinjer som analysen utgår ifrån.

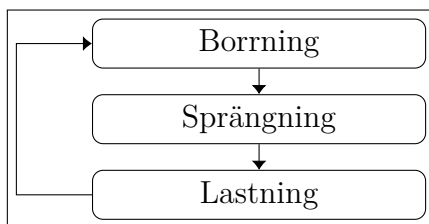
2.1 Byggarbetsplats i bergtunnel

Byggandet av en tunnel varierar mycket beroende på vilka markförhållanden som tunneln byggs i (A. Johansson, personlig kommunikation, 26 februari 2025). Exempelvis är tunnelbygge i berg oftast lättare än i lera eftersom lera kräver att ett dagschakt öppnas. Detta innebär att betydligt fler maskiner behövs för arbetet. Berg är generellt stabilare och färre arbetsmaskiner behövs.

Vid byggnationen av Västlänken sprängs en bergtunnel med ungefärliga dimensioner på 10x10 meter (A. Johansson, personlig kommunikation, 26 februari 2025). Vid vissa strategiska platser, exempelvis vid stationerna, är bergrummet som sprängs ut större. Eftersom markytan är begränsad och endast två maskiner kan passera varandra samtidigt, används färre arbetsmaskiner med hög lastkapacitet istället för flera med låg kapacitet.

2.1.1 Cykler för arbete

Ett arbete i en tunnel sker enligt borra-spräng-cykeln som kan sammanfattas i tre olika moment vilka presenteras i figur 2.1. Starten på cykeln är att hål borraras in i berget, sedan fylls hålen med sprängämnen som sedan detoneras, och slutligen lastas det material som lossnat ut ur tunneln efter att spränggaserna ventilerats bort (Johansson m. fl., 2021). Till det sista momentet tillkommer även moment som bortknackning av lösa bergbitar och injektering av cement. Cyklerna repeteras sedan, där frekvensen påverkas av storleken på tunnelbygget samt bergkvalitet, i vissa projekt sprängs det tre gånger om dagen - i andra en gång i veckan.



Figur 2.1: Cykler för byggnation av tunnel

I arbeten nära städer begränsas arbetet till största del av buller. I exempelvis bygget Västlänken sker ofta en cykel om dygnet. Borrandet sker under dagen då det arbetet är mest högljutt, sprängning sker på kvällen, och utlastning av material sker under natten (A. Johansson, personlig kommunikation, 26 februari 2025).

Utlastningsmomentet är det steg som drar mest energi och effekt samtidigt som det är minst elektrifierat idag (Johansson m. fl., 2021). Flera olika arbetsmaskiner används i utlastningsfasen, i denna rapport undersöks hjullastare och lastbilar.

2.1.2 Hjullastare

En hjullastare är en midjestyrd maskin med frontmonterad skopa som huvudsakligen används för att flytta, lyfta och lasta ut sprängt material (Stener och Snabb, 2008). Se figur 2.2 för exempelbild. I projektet Västlänken används en dieseldriven hjullastare i utlastningsfasen, med en vikt på ca 50 ton. En elektrisk hjullastare som är likvärdiga med dagens dieseldrivna finns inte på marknaden - alternativen har lägre skopvolym, lastkapacitet och drifttid.



Figur 2.2: Hjullastare. (Skapad med hjälp av ChatGPT (OpenAI, 2025) från prompten "Modern hjullastare", 2025)

Den hjullastare som används i Västlänken är av modell CAT 988K XE och är en tung hjullastare utrustad med en dieselektrisk drivlina, vilket kombinerar en dieselmotor med en elektrisk transmission. Maskinen har en tjänstevikt på ca 52,7 ton och en statisk tipplast på 27,5 ton (Zeppelin, u. å). Hjullastaren drivs av en CAT-C18 motor med en effekt på 432 kW.

2.1.3 Lastbilar

Vid utlastningsfasen i tunnelarbeten används lastbilar (se figur 2.3 för exempelbild), som kan utrustas med ett tippbart schaktflak som används för att köra ut bortsprängt material ur tunneln. Vid granskning av lastbilar framkom att eldrivna modeller kan uppnå likvärdig lastkapacitet som dieselmodeller, men räckvidden är kortare i ellastbilarna. I projektet Västlänken används Volvo FH - en tung lastbil avsedd för bland annat bygg- och anläggningstransporter med en motoreffekt på 368 kW (Volvo Lastvagnar, u. å). Den elektriska motsvarigheten till Volvo FH är Volvo FH Electric.



Figur 2.3: Lastbil utrustad med schaktflak. (Skapad med ChatGPT (OpenAI, 2025), med prompten "Lastbil med schaktflak", 2025)

2.1.4 Miljökrav på arbetsmaskiner

Trafikverket ställer krav på entreprenörerna gällande utsläppsnivåer och drivmedel för maskinerna, där lastbilar skall uppfylla Euro klass VI, och dieseldrivna arbetsmaskiner minst klass IV (A. Johansson, personlig kommunikation, 26 februari 2025).

Euroklasserna är utsläppsklasser som visar på hur mycket kolmonoxid, kolväten, kväveoxider och partiklar ett fordon släpper ut (Transportstyrelsen, 2024). Ju högre Euroklass, desto lägre är utsläppen. Dessutom skall samtliga fordon som används i Västlänken drivas på HVO100 (A. Johansson, personlig kommunikation, 26 februari 2025). Drivmedlet HVO100 är ett förnybart drivmedel och består av 100% hydrerad vegetabilisk olja (Gustavsson Binder, 2024). Det har en nästan identisk struktur med fossil diesel, vilket gör att det i stort sett kan användas i vanliga dieselmotorer i ren form vilket möjliggjort en snabb omställning av redan befintliga fordon.

2.2 Kostnader

Vid en övergång till elektrifierade arbetsmaskiner uppstår det olika kostnader som kan delas upp i investeringskostnader och löpande kostnader. Investeringskostnaden påverkas av olika inköpspris samt bidrag och subventioner. De löpande kostnaderna påverkas bland annat av bränsle- och service-kostnader.

2.2.1 Investeringskostnader

Investeringskostnaden för en eldriven arbetsmaskin är i dagsläget högre än för en likvärdig dieseldriven maskin. En rapport från 2024 uppskattar att kostnaden för elektriska arbetsmaskiner i genomsnitt är cirka 3,5 gånger så hög som för deras dieseldrivna motsvarigheter (Trafikverket). Dock förväntas de elektriska maskinkostnaderna sjunka i framtiden då produktionsvolymen förväntas öka (SWECO, 2023) samt att batteripriserna minskar (Burke m. fl., 2023). För att ta hänsyn till alla faktorer som påverkar initiala investeringskostnaden hanteras följande kategorier:

Inköpspris

Inköpspris är den initiala kostnaden för att införskaffa maskinerna. I tabell 2.1 presenteras inköpspriset för några av de olika maskinerna som används i västlänken.

Maskin	Inköpspris
CAT 988k XE	9 000 000
Volvo FH	2 200 000
Volvo FH electric	3 900 000

Tabell 2.1: Inköpspris för maskiner. *Priset för hjullastaren baseras på personlig kommunikation med K. Johansson, Zeppelin 14 mars 2024 och priserna för lastbilarna baseras på personlig kommunikation med P. Wahlström, Finnvedens lastvagnar 7 maj 2024.*

Investering i kaddinfrastruktur

Vid införande av elmaskiner tillkommer även behovet av laddinfrastruktur (Käck och Jansson, 2024). Laddning av arbetsmaskiner kan göras antingen genom normalladdning eller snabbbladdning. Vanlig laddning utförs genom kabelladdning där maskinen långsamt AC-laddas, exempelvis under natten när fordonet inte används (Käck och Jansson, 2024). Denna långsamma laddning är skonsammare både för batteriet och elnätet. Snabbbladdning tar betydligt kortare tid men sliter mer på batteriet och elnätet, då det ofta är frågan om DC-ström.

Beroende på typ av laddning som efterfrågas skiljer sig kostnaden för investeringen markant. För en icke-publik laddningstation kan kostnaderna skilja sig från cirka 3000 kr/kW för en AC-anslutning och 5000 kr/kW för en DC-anslutning (Lindgren, 2021).

Bidrag och subventioner

I Sverige finns olika bidrag att söka som syftar till att underlätta för olika aktörer att ställa om sin verksamhet och minska klimatpåverkan (Energimyndigheten, 2024a). De klimatpremier som presenteras nedan bidrar till att sänka det initiala inköpspriset för aktören.

Energimyndigheten har i uppdrag av regeringen att betala ut klimatpremie för att främja introduktionen av vissa miljöfordon på marknaden (Energimyndigheten, 2024b). Enligt Energimyndigheten finns det bestämmelser som kan berättiga till stöd i form av ersättning om högst 20% av miljöarbetsmaskinens inköpspris, dock

- högst 40% av prisskillnaden mellan miljöarbetsmaskinen och närmast jämförbara fordon
- högst 50 % av prisskillnaden mellan miljöarbetsmaskinen och närmast jämförbara fordon om maskinen endast drivs på el.

Klimatpremie för tunga lastbilar kan sökas av kommuner, företag och regioner som ska köpa eller leasa en ny eldriven lastbil (Energimyndigheten, 2024c). Lastbilen måste ha en totalvikt som överstiger 3,5 ton samt enbart drivas av el. Klimatpremien beräknas utefter ett antal olika parametrar och får beviljas för en utsläppsfri eldriven lastbil med ett belopp som motsvarar högst 25% av inköpskostnaden, dock

- högst 30 procent av den stödberättigande kostnaden när det gäller stora företag
- högst 50 procent av den stödberättigande kostnaden när det gäller medelstora företag, eller
- högst 60 procent av den stödberättigande kostnaden när det gäller små företag.

Utveckling av batterier

Utveckling av batteriteknik är en avgörande faktor för elektrifiering av arbetsfordon. Idag ligger den största kostnaden för elektriska fordon i batteriet, vilket bidrar till det höga inköpspriset (Burke m. fl., 2023). Ny forskning och teknologiska genombrott har bidragit till att batterikostnaden historiskt minskat. Bara det senaste decenniet har kostnaden för litium-jon batterier, som är det som används i dagens maskiner, minskat med 85% och med 97% sen dess introduktion 1991 (Orangi m. fl., 2024). I och med fortsatt forskning och industriell upptrappning förväntas kostnaden minska betydligt fram tills år 2030, och sedan fortsätta minska i en långsammare takt mellan 2030 - 2040 (Burke m. fl., 2023).

Det finns dock faktorer som kan stanna upp utvecklingen av sjunkande batterikostnader. Ett av de tydligaste exemplen är att tillgången och på så sätt även kostnaden för kritiska tungartsmetaller, exempelvis nickel, som drastiskt kan förändras (Mauler m. fl., 2022).

Det sker även utveckling av andra batterityper än litiumbatterier. Bland annat har natriumjonbatterier tagits fram som ett potentiellt alternativ till litiumjonbatterier, då batterier byggda på natrium har visat sig vara säkrare ur brandsynpunkt, mer miljövänliga, ha högre energitäthet och vara mer kostnadseffektiva jämfört med litiumbatterier (Zhao m. fl., 2023).

2.2.2 Löpande kostnader

Löpande kostnader utgör en stor andel av den totala kostnaden under en arbetsmaskins livscykel (SWECO, 2023). Hit räknas drivmedelskostnader samt kostnader

som uppstår vid produktionsavbrott eller maskinstillestånd, samt underhållskostnader.

Drivmedelskostnader

Bränslekostnaden utgör en betydande del av de totala driftkostnaderna, särskilt för större arbetsmaskiner. Därmed är potentialen för kostnadsbesparingar vid elektrifiering större för maskiner med hög bränsleförbrukning (Trafikverket, 2024b). Drivmedelsförbrukningen påverkas av flera faktorer, såsom maskinens tekniska specifikationer, arbetsbelastning samt de specifika driftförhållandena. Utöver detta tillkommer även drivmedelsförbrukning vid tomgång som måste tas med i beaktning.

Priset på HVO100 kan påverkas av flera faktorer (Gustavsson Binder, 2022). Dit hör bland annat produktionsvolym, tillgång och priser på råvaror, konkurrens bland producenter samt efterfrågan på andra marknader. Även eventuella sanktionsavgifter kopplade till reduktionsplikt eller inblandningsmandat, produktionskostnader, diesel- och oljepriser, valutakurser (särskilt dollarn) samt skatter och styrmedel spelar roll. Även elpriset kan variera och beror på flera olika faktorer såsom exempelvis utbud i förhållande till efterfrågan, omvärldsläget, elavtal samt tid på dagen för laddning (Energimarknadsinspektionen, 2021).

En rapport från IVL Svenska Miljöinstitutet visar att produktionsvolymen och då även utbudet av HVO100 kommer att öka fram till 2027 vilket kan bidra till en prissänkning. Men därefter kommer ambitiösa klimatmål inom EU bidra till ökad efterfrågan och på så sätt förhöjda priser (Gustavsson Binder, 2024). HVO100 är skattebefriat fram till 2026, men därefter kan priset komma att öka.

Kostnader vid avbrott i produktion

Arbetsmaskiner har en begränsad drifttid innan det behövs tillföras ny energi. För en dieseldriven arbetsmaskin krävs endast en kort stund för att fylla tanken vilket kan ske i tunneln, medan tiden för att ladda upp batteriet hos en elektrisk arbetsmaskin är längre. I en undermarksanläggning ökar dessutom stopptiden ytterligare eftersom batteriladdningen endast får ske utanför tunneln som följd av brandrisk (M. Lindgren, personlig kommunikation, 11 februari 2025). Detta riskerar att produktionen inte kan fortlöpa utan avbrott och att ekonomiska förluster uppstår.

Underhållskostnader

Underhållskostnader avser de kostnader som krävs för reparation och service. Kostnaderna beror på användningsgraden och varierar beroende på maskintyp. En dieselmaskin räknar arbetstimmar både vid aktivt arbete och vid tomgång. Eftersom en elmaskin saknar tomgång genereras färre drifttimmar per dag, vilket i sin tur minskar behovet av service. Detta kan innebära att elmaskiner har betydligt längre kalendertid mellan servicetillfällen jämfört med dieseldrivna maskiner (M. Lindgren, personlig kommunikation, 24 mars 2025; Lars Arnold, 2022).

2.3 Nyttor, besparingar och risker

Vid en omställning från dieseldrivna till elektrifierade arbetsmaskiner förändras flera externa effekter som kan betraktas som nyttor och besparingar såsom exempelvis minskade utsläpp och minskat buller, men även risker uppstår såsom en förändrad brandrisk.

2.3.1 Minskade utsläpp

Dieseldrivna maskiner i tunnelarbete använder idag drivmedlet HVO100, som betraktas som ett klimatneutralt drivmedel då koldioxid bundits in under råvarans livscykel. Det innebär att de totala växthusgasutsläppen kan bli lägre jämfört med fossilt diesel, beroende på hur livscykelanalysen genomförs men även beroende på hur bränslet har framställts (Gustavsson Binder, 2024). Om däremot endast utsläppen vid förbränning betraktas, utan att inkludera hela livscykeln, är skillnaden i koldioxidutsläpp mellan HVO100 och fossilt diesel mindre. Vid förbränning i dieselmotorer skapas även kväveoxider, kolmonoxid och andra partiklar som har visat sig ha stora hälsorisker för människan (Johansson m. fl., 2021). Användning av HVO100 ger dock generellt något lägre utsläpp av partiklar och kväveoxider jämfört med diesel (Na m. fl., 2015).

Eldrivna maskiner har inga utsläpp vid drift, vilket bidrar både till minskad klimatpåverkan samt även bättre luftkvalitet i bergtunneln vilket förbättrar arbetsmiljön (Trafikverket, 2023b). Däremot sker det växthusgasutsläpp under produktion. Sveriges elproduktion har de senaste fem åren befunnit sig mellan 18-29 gCO₂eq per kilowattimme el som producerats (Nowtricity, u. å). Genom att ta ett medelvärde på utsläppsdaten fås att produktion av el i genomsnitt släpper ut 24,2 gCO₂eq/kWh om året.

Växthusgasutsläppen som skapas ur ett livscykelperspektiv av HVO100 är enligt Energimyndigheten (2023) i genomsnitt cirka 10,5 gCO₂eq per megajoule år 2022, vilket motsvarar ungefär 37,8 gCO₂eq per kilowattimme.

Vid förbränning skapas utsläpp som kan uppskattas beroende på de olika ämnens emissionsfaktor, dessa presenteras i tabell 2.2.

Tabell 2.2: Emissionsfaktorer per energienhet (M. Lindgren, personlig kommunikation, 24 mars 2025)

Parameter	Värde (g/kWh)
NO	0,4
PM	0,0047

2.3.2 Minskade ventilationskostnader vid eldrift

Ventilationssystem är en viktig del av en tunnel under uppbyggnad genom att tillföra frisk luft till tunneln och reglera temperatur (Trafikverket, 2023b). I tunnelbygget Västlänken står elanvändningen av ventilationen för en tredjedel av den totala elanvändningen, endast tunnelborren har en högre andel (A. Johansson, personlig kommunikation, 26 februari 2025). Elektrifiering av maskiner i en tunnelbyggnation, vilket minskar utsläppen, kan minska behovet av ventilation inne i en tunnel under uppbyggnad. Dessutom producerar elektriska motorer mindre värme jämfört med dieseldrivna maskiner vilket kan minska ventilationsbehovet ytterligare. Viktigt att poängtera är dock att mängden spränggas ej kommer förändras vid eldrift, utan behovet av forcerad ventilation efter sprängning kommer fortsatt vara detsamma (Johansson m. fl., 2021).

2.3.3 Lägre bullernivåer

Flera jämförande studier mellan dieseldrivna och elektriska arbetsmaskiner inom gruvdrift har visat att bullernivåerna från dieseldrivna maskiner är avsevärt högre än från elektriska maskiner. Elektrifiering av maskinparken kan därmed bidra till lägre bullerexponering och en förbättrad arbetsmiljö (Tahmasebi, 2018, Roy och Adhikari, 2007).

2.3.4 Ökad brandrisk

Vid en övergång till elektrifierad drift finns det också risker med en ny teknik som behöver hanteras. (Trafikverket, 2023b). Den största identifierade risken är den förändrade brandrisken jämfört med dieseldrift (Heger O m. fl., 2023). Även om bränder förväntas vara mer sällsynta i elektrifierade arbetsmaskiner jämfört med dieseldrivna måste det längre brandförloppet, som kan innefatta termisk rusning, tas i beaktande. Dessutom kan en sådan brand leda till utsläpp av många farliga ämnen, vilket utgör en ytterligare riskfaktor.

Vid en övergång till batteridrivna arbetsmaskiner tillkommer därmed ett behov att utforma nya säkerhetsrutiner för att förebygga brandrisken i tunnlar, exempelvis bör eldrivna arbetsmaskiner endast laddas utanför tunnel då risken för brand är förhöjd under laddning av batterier (Mallick och Gayen, 2023).

2.4 Existerande regelverk

Det finns flera olika lagar och regler som påverkar utformningen av byggprojekt och som kan medföra olika ekonomiska kostnader. Bland annat finns det lagar och förordningar från Arbetsmiljöverket som reglerar arbetsmiljökrav på arbetsplatser. Vidare finns det kostnader kopplade till olika typer av utsläpp, exempelvis genom

svensk koldioxidskatt som gör att alternativ med högre utsläpp medför högre kostnader för aktörerna. Dessa regleringar innebär att vissa externa kostnader redan internaliseras genom lagstiftningar och skatter.

2.4.1 Krav på ventilation

I ett instängt utrymme finns det behov av ventilering för att inte för höga koncentrationer av farliga ämnen ska ansamlas samt att inte temperaturen ska vara för hög. År 2025 gäller att gränsvärdet för dieselavgaser är 0.05 mg/m^3 (AFS 2023:14). Dessutom ska ett specifikt gränsvärde införas vid gruvdrift under jord och tunnelbygge från den 21 februari 2026 vilket kommer höja kraven för att uppfylla god arbetsmiljö. Detta värde är ännu inte fastställt (AFS 2023:12).

2.4.2 Svensk koldioxidskatt och energiskatt

Energi och koldioxidskatt betalas i princip för alla bränslen som används vid motor-drift (Skatteverket, 2025). Skattesatserna varierar beroende på typ av bränsle och är uppdelad i dels en energiskatt och en koldioxidskatt.

HVO100 som används som drivmedel idag räknas som klimatneutralt och är skattebefriat fram till 2026 (Finansdepartementet, 2022). Skattesatsen på el är 43,9 öre per kilowattimme (Skatteverket, u. å).

3

Metod

För att undersöka hur elektrifiering av byggarbetsmaskiner påverkar kostnader och externa effekter har en kostnads-nyttoanalys genomförts. Därutöver intervjuades aktörer med erfarenhet av utlastningsfasen i syfte att identifiera praktiska hinder och möjligheter samt få en djupare förståelse för hur dessa aktörer ställer sig till resultatet från kostnads-nyttoanalysen. Nedan beskrivs hur kostnadsnyttoanalysen genomfördes, hur olika parametrar i analysen beräknats samt hur intervjustudien genomfördes.

3.1 Kostnads-nyttoanalys

I detta projekt har en kombination av en samhällsekonomisk och en företagsekonomisk kostnads-nyttoanalys genomförts. En samhällsekonomisk kostnads-nyttoanalys väger i grunden en åtgärds samhällliga nyttor mot dess kostnader (Trafikverket, 2024c) medan en företagsekonomisk kostnads-nyttoanalys bedömer lönsamheten ur perspektivet hos en enskild aktör eller företag (Thrikawala m. fl., 2022). Syftet med de sammanslagna analyserna är att dels belysa externa effekter som skapar samhällsreliga kostnader men även tydliggöra direkta kostnader för enskilda aktörer.

Trafikverket beskriver i rapporten *Analysmetod och samhällsekonomiska kalkylvärden för transportsektorn*, förkortat ASEK 8, vilka steg som ingår i en samhällsekonomisk kostnad-nyttoanalys och hur dessa bör genomföras (2024c). Denna metod ligger till grund för den analys som genomfördes i denna studie, i kombination med en generell metod för företagsekonomisk kostnads-nyttoanalys.

Nedan presenteras de olika delsteg som genomfördes i kostnads-nyttoanalysen:

1. Definiering och avgränsning av åtgärden

Först definierades och specificerades vad analysen skulle innehålla, genom tydliga frågeställningar samt avgränsningar.

2. Identifiering av beräknade och ej beräkningsbara effekter

Därefter identifierades tänkbara effekter som i bred mening kan kategoriseras som kostnader eller intäkter för både aktören och samhället. Exempel på sådan effekter är utsläpp av koldioxid men även andra föroreningar. De förväntade effekterna värderades enligt Trafikverkets kalkylbilaga (2024c).

3. Kvantifiering och värdering

De identifierade effekterna kvantifierades och värderades, och effekter som inte kunde kvantifieras beskrevs kvalitativt.

Vid beräkningen av ekonomiska kostnader vid elektrifiering av arbetsmaskiner i tunnelbyggen inkluderades investeringskostnader, driftkostnader och underhållskostnader under maskinens livslängd, för att få en heltäckande bild av den ekonomiska aspekten för aktören. I projektet användes tekniska specifikationer från återförsäljare av arbetsfordon för att specificera viktig data, exempelvis inköpskostnad och genomsnittlig bränsleförbrukning. I analysen togs skattekostnader och bidrag med för att påvisa kostnadsbilden för den enskilda entreprenören.

Klimatrelaterade effekter värderades enligt den värderingssats som finns i Trafikverkets ASEK 8. Värderingen kallas åtgärdskostnadsansatsen och härleds från Sveriges långsiktiga klimatmål. Värderingen baserades på kostnaden för den klimatåtgärd som krävs för att nå klimatmålet. I fallet för landbaserade transporter baserades koldioxidvärderingen på kostnaden för att fasa ut fossila utsläpp från förbränningsmotorer genom att använda biobränslen.

Värderingen av koldioxidutsläpp som är baserad på ASEK:s riktlinjer kan jämföras med det interna koldioxidpris som många aktörer använder i investeringskalkyler. Detta är i förberedelse för att möta kostnader som förväntas som ett resultat av prissättning av utsläpp genom koldioxidskatt eller handel med utsläppsrätter (UN Global Compact Network Sweden, 2024). Värderingen kan på så sätt spegla både kostnad för aktören och samhället.

4. Nuvärdesberäkning av nyttor och kostnader

Då kostnader och nyttor uppstår vid olika tidpunkter omräknades de till ett gemensamt värde idag. För detta användes nuvärdesmetoden där framtida kostnader och nyttor diskonterades med en kalkylränta.

5. Sammanställning av kalkyl och tolkning av resultat

Nuvärdet av alla nyttor, exempelvis besparingar eller miljövinster, jämfördes med kostnaderna, exempelvis driftkostnader och investeringskostnader. Endast de händelser som inträffade under kalkylperioden sammanställdes och summerades.

6. Genomförande av känslighetsanalyser

Slutligen bedömdes kvaliteten på de underlag som användes i kalkylen. Detta genomfördes genom att undersöka hur utfallet på analysen förändrades om olika aspekter, framförallt priser, skulle ändras i framtiden. På så sätt undersöktes hur robust analysen är.

Kalkylen ges i kr, för utförlig uträkning se appendix (A.1)

3.2 Beräkningar och uppskattade kostnader

I analysen har ett antal uppskattningar och beräkningar genomförts för att ta fram relevanta kostnads- och miljömässiga parametrar. Nedan beskrivs hur dessa värden har beräknats eller uppskattats, samt vilka antaganden som legat till grund för respektive del.

I denna rapport analyseras två lastbilar, en dieseldriven och dess elektriska motsvarighet. Lastbilarnas effekt, storlek och vikt beror på utrustning, därför används ungefärliga uppskattningar i rapporten. Exempelvis finns Volvo FH i flera olika motoreffekter - i denna rapport används lastbilen med effekten 368 kW.

3.2.1 Uppskattning av inköpskostnad för eldriven hjullastare

I dagsläget finns ingen eldriven hjullastare som motsvarar en CAT 988K XE, vilket är det dieselalternativ som används i tunnelbyggande. För att utföra en jämförelse mellan el och dieseldrivna hjullastare tas således en hypotetisk eldriven hjullastare fram som uppfyller de krav som finns för de dieseldrivna maskinerna.

Vid kostnadsberäkningen för den eldrivna hjullastaren antogs att alla kostnader är samma som för den dieseldrivna varianten (se inköpspriset för hjullastaren i avsnitt 2.2.1), förutom motorlösningen. Motorlösningen beräknades till att vara 10% av den totala kostnaden för den dieseldrivna hjullastaren. Denna kostnad subtraherades från den dieseldrivna hjullastaren och sedan summerades resterande maskinkostnad med kostnad för en elektrisk motorlösning med energilagring. För att uppskatta kostnaden för energilagringen dimensionerades ett batteri som kunde utföra en hel arbetsdag utan att ladda. För kalkylen antogs kostnaden vara 150 dollar/kWh men den förväntas att minska i framtiden (se kapitel 2.2.1, Link m. fl., 2024). Därutöver beräknades kostnaden för en elmotor med samma kapacitet som den dieseldrivna.

3.2.2 Uppskattning av drift- och servicekostnad

Kostnaden för el- och diesel-förbrukning räknades ut genom att multiplicera drivmedelsförbrukningen för de olika maskinerna med priset för HVO100 respektive elpriset. ASEK listar i sin kalkylbilaga drivmedelskostnaderna där HVO uppskattas till 13,7kr/liter och el 0,58 kr/kWh alternativt 2,8 kr/kWh vid snabbbladdning.

Lastbilens drivmedelsförbrukning tas fram genom antalet km per år multiplicerat med lastbilens förbrukning per kilometer. För hjullastaren baserades drivmedelsförbrukningen på antalet drifttimmar per år multiplicerat med hjullastarens förbrukning. En genomsnittlig drivmedelsförbrukning för tunga lastbilar har använts och sattes till 0,418 l/km för dieseldrivna och 1,82 kWh/km för eldrivna (Myhrberg och Ricknell, 2024). Hjullastaren hade en genomsnittlig drivmedelsförbrukning på 27,06 l/h i Sverige. I dagsläget finns det endast en sådan maskin som användes i tunnel och

den enskilda maskinen förbrukar 35,6 l/h (K. Johansson, Personlig kommunikation, 14 mars 2025).

För att uppskatta elförbrukningen hos den uppskattade elektriska hjullastaren omräknades dieselförbrukningen till motsvarande elenergibehov. Metoden bygger på att dieseln energiinnehåll omvandlades till mekaniskt arbete med verkningsgraden för den dieseldrivna hjullastaren, och därefter översattes detta till elbehov med hänsyn till elmotorns högre verkningsgrad. Dieselmotorns verkningsgrad antogs vara 45% medan elmotorn antogs ha en verkningsgrad på 85%.

För att ta hänsyn till dieselanvändningen vid tomgång för lastbilen antogs tomgångskörning under 30% av tiden och literanvändningen i timman antogs vara 2 l/h (WSP, 2021). För hjullastaren hämtades ett specificerat värde från ett verkligt scenario, där tomgångskörning var inkluderad.

Som nämnt i avsnitt 2.2.2 baserades servicebehovet utefter löpande drifttimmar eller kilometer beroende på maskintyp. Lastbilen antogs ha en årlig körsträcka på 60 000 km och genomsnittliga service och reparationskostnader på 1.51 kr/km för dieseldriven och 1.33 kr/km för den eldrivna (Myhrberg och Ricknell, 2024). För hjullastaren antogs en service- och reparationskostnad på 32,44 kr/drifttimme för den dieseldrivna och 25,56 kr/h för den eldrivna (Kjendseth Wiik m. fl., 2020). Priset omräknades från norska kronor (NOK) till svenska kronor (SEK) enligt valutakursen 1 NOK = 0,98 SEK.

3.2.3 Beräkning och värdering av utsläpp

Utsläppen som skapas från förbränning och produktion av HVO100 beräknades utifrån ett livscykelperspektiv då bränslet bundit koldioxid under livscykeln (utsläppsvärden presenteras i avsnitt 2.3.1). Även koldioxidutsläppen för produktion av el togs med i analysen, och baserades på medelvärde av utsläpp från 2020-2024.

Vid drift av dieseldrivna maskiner sker utsläpp av andra partiklar och avgaser förutom koldioxidutsläpp som inkluderades i analysen. De olika emissionsfaktorerna som användes i analysen presenteras i tabellen 2.2, och utsläpp av luftburna partiklar (PM) samt utsläpp av kväveoxider (NO_x) i gram beräknades med lastfaktorn 0.6, enligt följande formel:

$$\text{Utsläpp (g)} = \frac{\text{Installerad motoreffekt (kW)} \times \text{Drifttimmar (h)} \times \text{Emissionsfaktor (g/kWh)} \times \text{Lastfaktor}}{\text{Lastfaktor}}$$

För att värdera koldioxidutsläppen samt utsläppen av partiklar samt kväveoxider användes värderingssatserna och skadekostnaderna som presenteras i tabellerna i ASEK8 kalkylbilaga. Vid värdering av utsläpp av koldioxid användes den interna koldioxidvärderingen per år för vägtrafik och bantrafik (tabell 14.1). För partiklar samt kväveoxider användes värdering av luftföroreningar från vägtrafik, lokala och regionala effekter (tabell 13.1). I analysen användes endast skadekost-

nader för lokala effekter kopplat till hälsa för kväveoxider och avgaspartiklar då hälsoeffekter av arbete i bergtunnel var en viktig del av analysen.

3.2.4 Uppskattning av daglig drifttid

Drifttiden under en dag (h/dag) har i kalkylen antagits till 6 timmar för hjullastare och 8 timmar för lastbil efter kommunikation med entreprenörerna i Västlänken. Utöver detta har det i analysen antagits ett tillägg på en halvtimme om dagen för den elektriska hjullastaren, för att täcka transporttiden till och från laddningsplatsen som befinner sig utanför tunneln.

Som nämnt i avsnitt 2.2.2 antogs det att elmaskinerna går på tomgång under 30% av drifttiden. Detta medförde att drifttiden för de eldrivna maskinerna minskade då motorn inte användes under den tiden som vore fallet för de dieseldrivna maskinerna.

3.2.5 Uppskattning av avskrivningstid

Tidsspannet som kalkylen sträcker sig över är av relevans, bland annat om break-even punkten för en maskin med hög inköpskostnad men lägre användningskostnad ligger utanför avskrivningstiden. Dieseldrivna arbetsmaskiner antogs i tunnelbyggande har en livslängd på 8 år (A. Johansson, personlig kommunikation, 26 februari 2025), då arbetet är slitande. En liknande livslängd antogs för de eldrivna arbetsmaskinerna, men eftersom en eldriven maskin har färre rörliga delar än en dieseldriven kan livslängden i framtiden komma att bli längre för eldrivna arbetsmaskiner (California Department of Transportation, 2024). Den potentiellt längre avskrivningstiden togs inte med i den ekonomiska analysen, och inte heller maskinernas eventuella ekonomiska värde på en andrahandsmarknad.

3.2.6 Skillnader i pris över tid

Eftersom analysen sträcker sig över flera år användes en diskonteringsränta för att nuvärdesberäkna olika nyttor och utgifter som sker vid olika tillfällen i framtiden. I denna kalkyl har en diskonteringsränta på 3,5% använts vilket är rekommendationen i ASEK för samhällsekonomiska kalkyler (Trafikverket, 2024c). Diskonteringsräntan är real, vilket betyder att framtida kostnader inte har justerats för inflation. Detta är standard i samhällsekonomiska kalkyler.

De värden som är tagna från ASEK 8 kalkylbilaga är uttryckta i 2019 års penningvärde. Dessa värden räknas om till dagens penningvärde genom att räkna ut en omräkningsfaktor från konsumentprisindex (KPI) år 2019 och år 2025.

3.2.7 Övriga antaganden

Utöver de tidigare redovisade antaganden har även följande antaganden använts som grund för analysen.

- Vid bergtunneln antas tillräcklig elförsörjning och kapacitet redan vara tillgänglig, men för att möjliggöra laddning krävs investeringar i särskild laddinfrastruktur.
- För beräkning av bidrag och subventioner för elektriska lastbilar har stora företag används som grundantagande.
- Ventilationsbehovet för en eldriven maskin antas i analysen vara en tredjedel av behovet för en dieseldriven maskin.
- Krav på ventilation antas inte vara högre än de regler som finns i dagsläget. Dessutom undersöks endast en maskin av hjullastare och lastbil, som därmed har lägre behov av ventilation än en fullskalig maskinpark.

3.3 Intervjuer

Semi-strukturerade intervjuer genomförs med aktörer som äger och driver arbetsmaskiner i bergtunnlar för att få en djupare förståelse av praktiska hinder kopplade till resultatet av kostnads-nyttoanalysen.

En intervjuguide i form av ett öppet frågeformulär har utformats, med fokus på erfarenheter av elektriska maskiner, tekniska och ekonomiska hinder, samt för- och nackdelar jämfört med dieselmaskiner. Alla respondenter får samma frågor i samma ordning för att säkerställa jämförbarheten av svaren. Intervjuer genomförs digitalt, spelas in och ljudet transkriberas för analys. De namngivna respondenterna anonymiseras och hänvisas till som (R1-R3). Alla sammanfattningar av intervjuerna kan hittas i bilagasektionen B.

Tre intervjuer genomfördes med totalt fyra olika personer från tre olika företag. Två av respondenterna var från samma företag (Veidekke) och intervjuades tillsammans. De har behandlats som en grupprespondent (R1) eftersom de delade samma åsikt om alla frågor. Intervjupersonerna och deras yrkestitlar med tillhörande företag listas i tabellform i 3.1.

Tabell 3.1: Översikt över genomförda intervjuer

Respondent	Företag	Roll / Titel	Företagets verksamhet
R1	Veidekke Entreprenad AB	Platschef och arbetsledare, Västlänken	Entreprenör med erfarenhet av tunnelarbeten, särskilt från utlastningsfasen i Västlänken. Två personer intervjuades vid samma tillfälle och behandlas som en gemensam respondent.
R2	Renta	Platschef Varberg	Maskinuthyrning. Har levererat utrustning till större tunnelprojekt, inklusive Varbergstunneln.
R3	GLC	Affärsutveckling/Försäljning	Ekonomisk förening som samordnar cirka 80 fristående åkerier. Fokus på materialtransporter till och från arbetsplatser.

4

Resultat

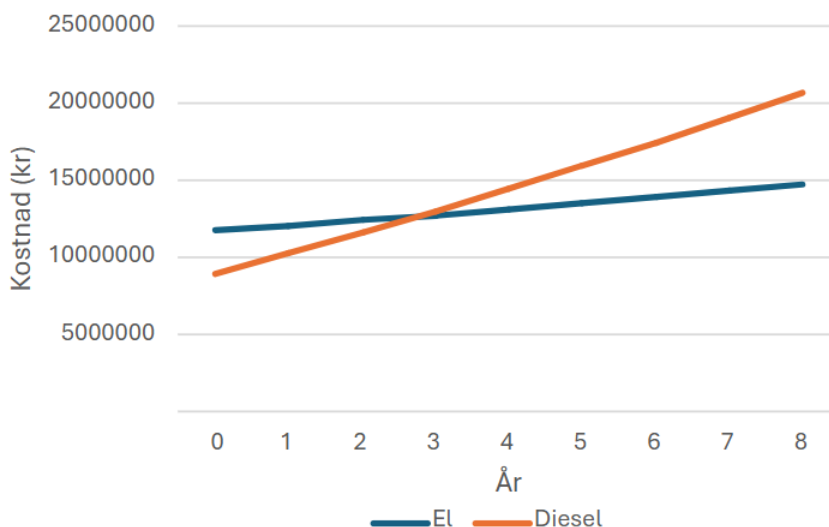
Kapitel 2 och 3 utgör grunden för nyttokostnadsanalysen genom att beskriva olika kostnader och nyttor. Nedan presenteras resultatet av nyttokostnadsanalysen och ej beräkningsbara effekter samt en känslighetsanalys av kalkylen. Därefter sammanfattas även hinder med elektrifiering vid tunnelarbeten.

4.1 Kostnadsnyttoanalys

I detta kapitel presenteras kostnader för dieseldrivna och elektriska hjullastare och lastbilar, vilka används i utlastningsfasen i tunnelarbete. Kostnaderna innefattar inköpspris, drifts- och servicekostnad, kostnad för ventilation, kostnad av laddinfrastruktur och energiskatt för de eldrivna maskinerna, samt skadekostnader för emissioner under drift. Dessutom tillkommer subventioner för de eldrivna maskinerna. Merparten av kostnaderna bygger på antaganden om daglig drifttid samt årlig körsträcka vilka presenterades i avsnitt 3.2. Utifrån beräknade kostnader kan en jämförelse mellan dieseldrivna och eldrivna maskiner utföras. Kalkylen ges i kr (för uträkning se appendix A.1).

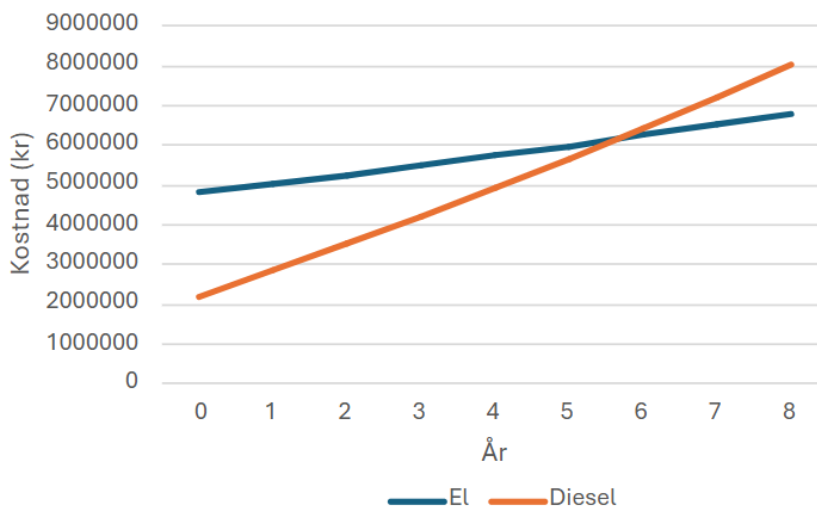
För både hjullastaren och lastbilen börjar den totala kostnaden vid år noll med initialkostnader (totala inköpspriset för de olika maskinerna samt laddinfrastruktur och subventioner för de eldrivna alternativen), se figur 4.1 och 4.2. För resterande år inkluderas alla löpande kostnader, inklusive kostnad för samhällsliga skadekostnader för emissioner. De eldrivna alternativen har en högre initialkostnad, men de löpande årliga kostnaderna för de dieseldrivna alternativen är högre, och således är båda dieseldrivna alternativ dyrare under åtta år än motsvarande eldrivna.

Den eldrivna hjullastaren uppskattades att ha ett inköpspris som var 32% dyrare än den dieseldrivna (se avsnitt 3.2.1), men över åtta år är den totala kostnaden för den elektriska hjullastaren 28 % lägre. I figur 4.1 syns att den totala kostnaden är densamma för de två alternativen efter drygt 3 år.



Figur 4.1: Kostnad över tid hjullastare

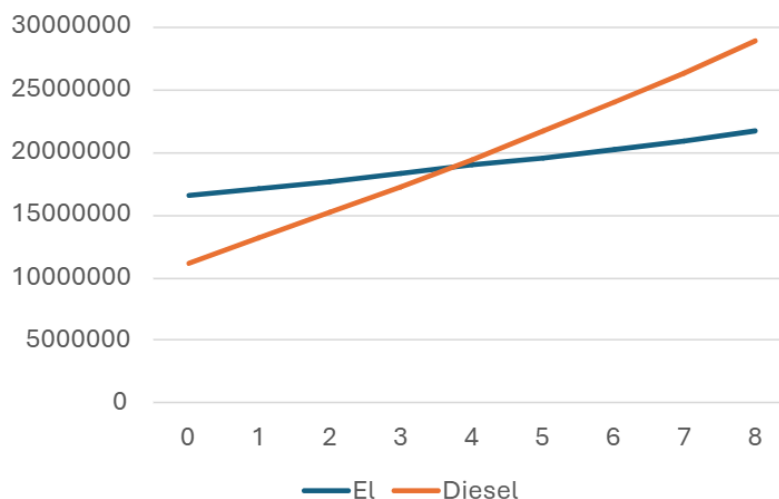
För den elektriska lastbilen är inköpskostnaden 77% högre, men över tid kommer den totala kostnaden för det eldrivna- och det dieseldrivna alternativet närmare kostnadsmässigt. Det är först efter fem till sex år som den eldrivna lastbilen har samma kostnad som den dieseldrivna (Figur 4.2), och efter åtta år är den totala kostnaden för ellastbilen 15% lägre. Detta är delvis en följd av att initialkostnaden är betydligt högre för det eldrivna alternativet och dessutom är den erhållna klimatpremiären lägre än för den eldrivna hjullastaren.



Figur 4.2: Kostnad över tid lastbil

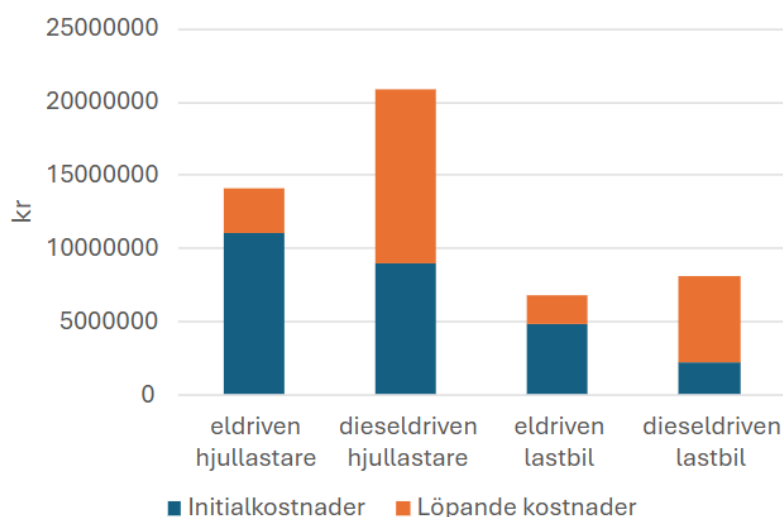
I ett scenario där både en hjullastare och lastbil undersöks blir den totala skillnaden i kostnad över tid stor. Initialt är kostnaden nästan 50% högre för det eldrivna alternativet, men efter åtta år är det dieseldrivna alternativet 30% högre (se figur 4.3). Kostnaden är den samma efter drygt fyra år. För en enskild aktör är initial-

kostnaden en viktig del i valet av maskin - i det beräknade scenariot är de eldrivna alternativen fem miljoner dyrare. Observera att två separata laddstationer antas för initialkostnaden av de eldrivna alternativen i kalkylen.



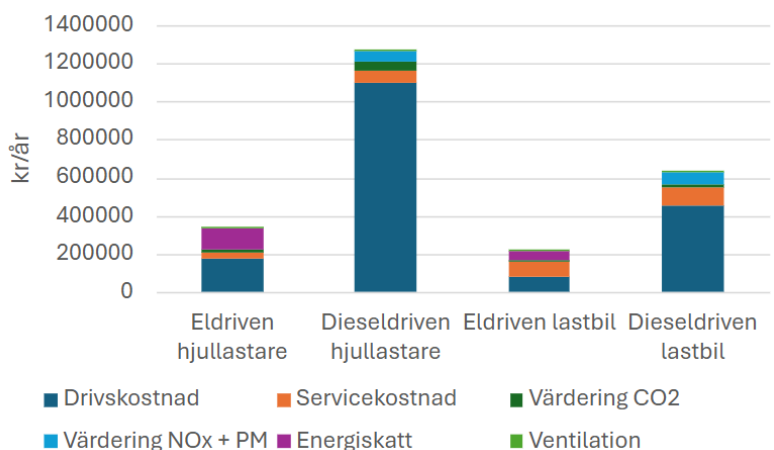
Figur 4.3: Kostnad över tid hjullastare och lastbil (kr)

För både lastbilen och hjullastaren är inköpskostnaden högre för det eldrivna alternativet, även efter att kostnaden subventioneras. Däremot är den löpande kostnaden högre för de dieseldrivna alternativen, som bland annat drar mer bränsle på grund av sämre verkningsgrad och till ett högre drivmedelspris. Den löpande kostnaden är fem gånger större för den dieseldrivna hjullastaren, och 2.5 gånger större för den dieseldrivna lastbilen, jämfört med de eldrivna alternativen vilket kan ses i figur 4.4.



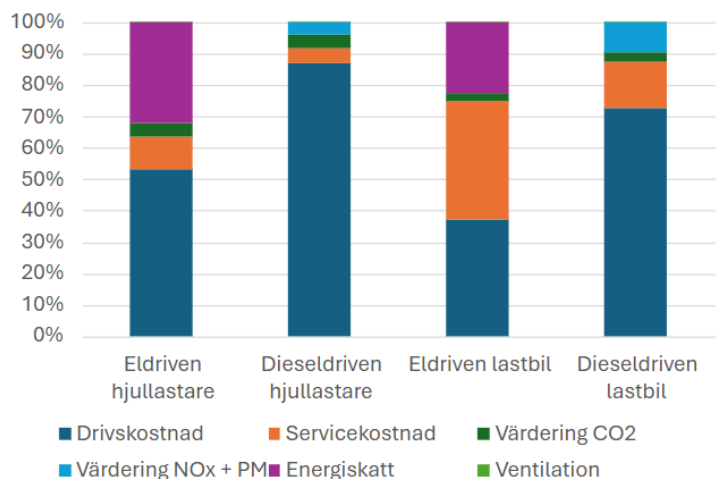
Figur 4.4: Totala kostnader

Det är en viss variation för den löpande kostnaden för de olika arbetsmaskinerna, men kostnaden för drivmedel är en stor del för alla maskinerna följt av servicekostnad vilket kan ses i figur 4.5.



Figur 4.5: Löpande kostnader per år

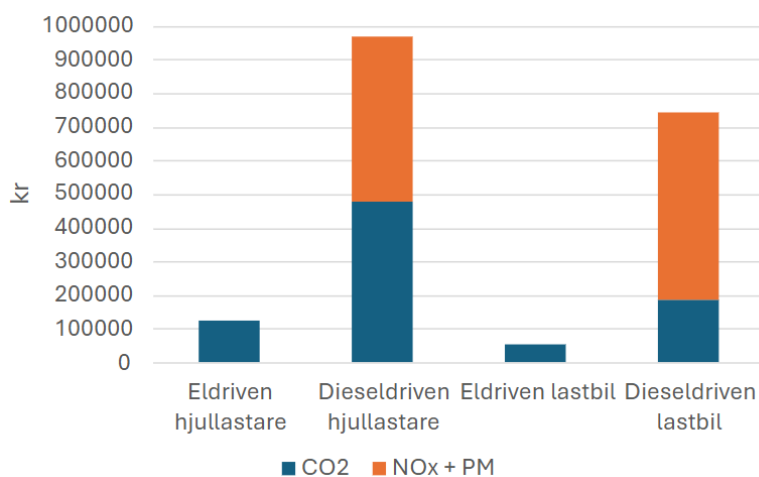
För de eldrivna maskinerna kommer merparten av kostnaden från inköp av el, samt kostnad för energiskatt och service, där hjullastaren har drivmedel som största andel och lastbilen servicekostnad (se figur 4.5). För dieselmaskinerna identifieras att den löpande kostnaden främst består av kostnad för diesel och mindre andelar av servicekostnader samt värdering av koldioxidutsläpp, kväveoxider och partiklar. Utifrån figur 4.5 minskar de löpande kostnaderna till en fjärdedel respektive en tredjedel, för hjullastaren samt lastbilen vid en omställning till eldrivet alternativ. För de eldrivna alternativen är servicekostnaden och energiskatten en större andel av den totala löpande kostnaden än dieselalternativen (se figur 4.6).



Figur 4.6: Löpande kostnader per år (%)

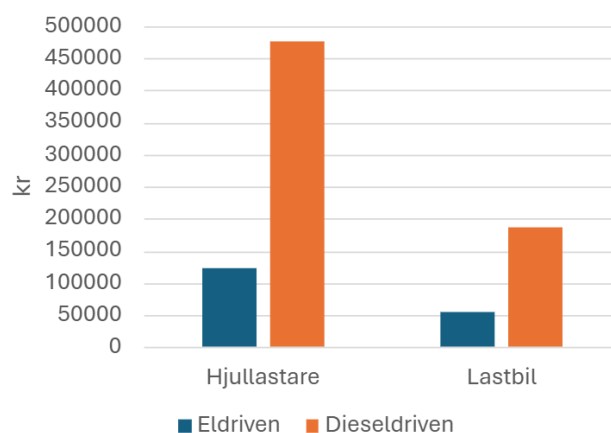
För de indirekta kostnaderna, alltså samhälleliga skadekostnader för utsläpp av koldioxid, kväveoxider samt partiklar, bidrar de dieseldrivna alternativen till cirka tio gånger högre kostnad gällande emissioner totalt över åtta år (se figur 4.7). Detta är kostnader som aktören inte betalar själv i nuläget men som skapar kostnader för samhället. Koldioxidutsläpp påverkar klimatet negativt medan utsläpp av kväveoxider och partiklar skapar hälsorisker för de som jobbar i närområdet. Som nämnts

i avsnitt 2.3.1 släpper eldrivna fordon inte ut några emissioner under drift, utan endast vid elproduktionen. För den dieseldrivna hjullastaren är andelen utsläpp av koldioxid och luftföroreningar ungefär lika stora. För lastbilen däremot orsakar luftföroreningarna högre kostnader än koldioxidutsläppen.



Figur 4.7: Värdering av emissioner över åtta år

Den största skillnaden vid övergång till eldrift från dieseldrift är att utsläpp av partiklarna NOx och PM, vilket värderats till ungefär en halv miljon kronor totalt per maskin, elimineras. Som visas i figur 4.8 minskar utsläppen av koldioxid med 75% för hjullastare och 70% för lastbilen vid användning av el istället HVO100.



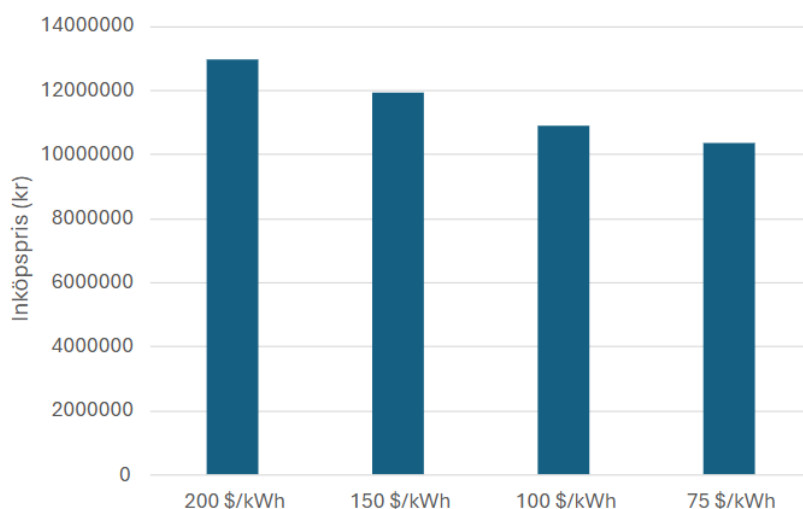
Figur 4.8: Värdering av CO₂-emissioner över åtta år

4.2 Känslighetsanalys av kalkylen

Det finns osäkerheter i analysen samt även flera faktorer som kan komma att förändras under de närmaste åren och vilket påverkar utvecklingen av övergången till elektrifierade arbetsfordon. I detta kapitel görs känslighetsanalyser på framtida batteripriser, på framtida bidrag och subventioner, samt på olika laddningstyper.

4.2.1 Utveckling av batterier i elektrifierade arbetsfordon

Som beskrivet i kapitel 2.2.1 kan kostnaden för batterier komma att förändras i framtiden. Eftersom den elektriska hjullastarens inköpspris har uppskattats utifrån förväntade kapaciteter, kan resultatet i kostnads-nyttoanalysen ändras om ett framtida pris skiljer mot det uträknade. Som beskrivet i avsnitt 3.2.1 användes ett pris på 150 dollar per kWh i analysen. För att undersöka möjliga framtida kostnader görs tre känslighetsanalyser: en där batterikostnaden förväntas öka till 200 dollar per kWh och två där batterikostnaden förväntas minska till 100 respektive 75 dollar per kWh. Hur batteripriset påverkar den totala inköpskostnaden för hjullastaren presenteras i figur 4.9.



Figur 4.9: Påverkan av batteripriser på totala inköpspriset för hjullastare

Figur 4.9 visar att om batterikostnaden ökar till 200 dollar per kWh, från grundscenariot 150 dollar per kWh, sker en kostnadsökning med ca en miljon kronor. Om batterikostnaden istället minskar till 100 respektive 75 dollar per kWh minskar totalkostnaden med ca en miljon respektive en och en halv miljon från värdet i kalkylen. För en analys över hur olika inköspriser förändrar total kostnaden se kapitel 4.2.3, figur 4.11. Break-even punkten flyttas med ett år tidigare eller senare beroende på kostnaden för batterier.

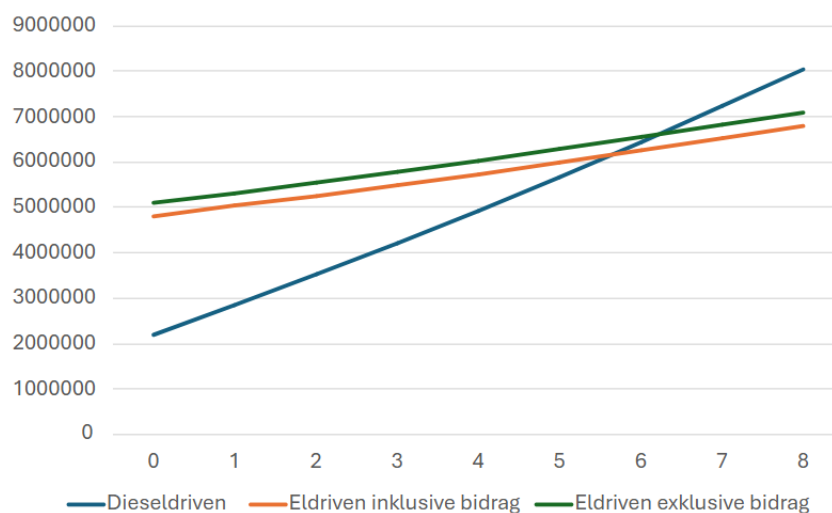
I avsnitt 2.2.1 beskrivs möjliga nya batteriteknologier såsom natriumjonbatterier, som bland annat kan bli kostnadseffektivare än litiumjonbatterier. De används inte i storskalig produktion idag, men det kan förändras i framtiden, och således leda till att inköpskostnader för eldrivna maskiner minskar.

4.2.2 Bidrag för eldrivna maskiner

Som nämnt i avsnitt 2.2.1 tillkommer det idag bidrag i form av en klimatpremie som täcker en del av inköpskostnaden, och som är baserat på skillnaden mellan inköps-

kostnaden för eldrivna och dieseldrivna maskiner. Premien kan komma att ändras i framtiden och därför görs en känslighetsanalys av totalkostnaden om bidraget upphör.

Utifrån inköpskostnaden får den eldrivna lastbilen bidrag för 8% av den totala inköpskostnaden vilket blir ungefär 300 000 kronor, och ändrar break-even punkten med ett halvt år (se figur 4.10).

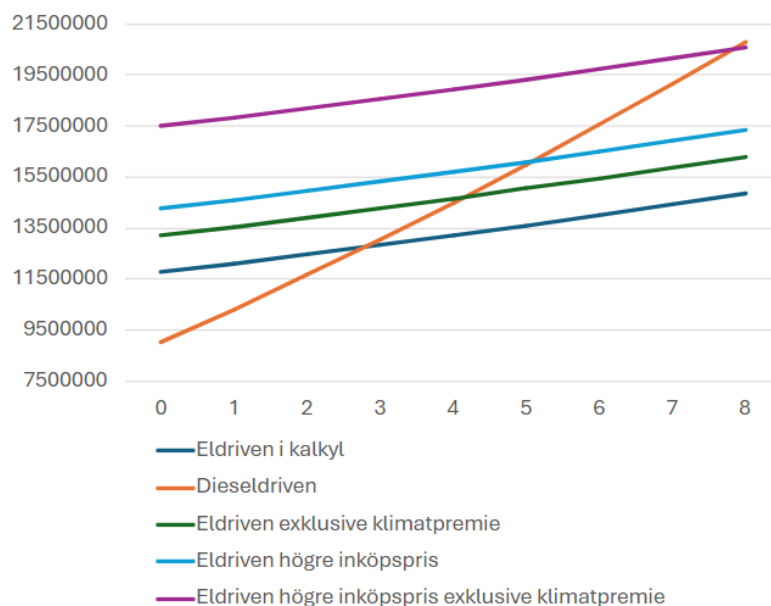


Figur 4.10: Påverkan av klimatpremie lastbil

För hjullastaren ges bidrag för 14% av den totala inköpskostnaden, vilket motsvarar nästan en och en halv miljon kronor (påverkan för hjullastaren analyseras i kapitel 4.2.3). Detta medför att break-even punkten blir ett och ett halvt år senare för hjullastaren (se figur 4.11). Att storleken på subventionerna skiljer sig åt mellan lastbilen och hjullastaren beror dels på utformningen av de olika bidragen samt att skillnaden i inköpspris mellan den dieseldrivna och eldrivna hjullastaren är större än skillnaden mellan lastbilarna.

4.2.3 Inköpspris för beräknad hjullastare

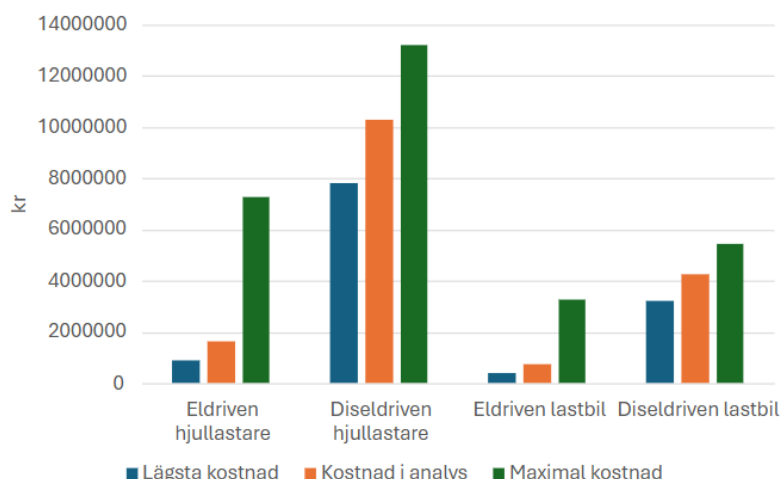
Enligt kalkylen för kostnaden av den eldrivna hjullastaren (se kapitel 3.2.1) beräknades en hjullastare med samma kapacitet som en dieseldriven till att kosta 32% mer, före bidrag från klimatpremie. Generellt gäller dock att inköpskostnaden är högre för elektriska maskiner (se kapitel 2.2.1), exempelvis är den elektriska lastbilen 80% dyrare än den dieseldrivna lastbilen. Om samma procentsats antas för inköpskostnaden av den eldrivna hjullastaren (samt inklusive klimatpremie) tar det fem år istället för tre år innan break-even punkten (se figur 4.11). Om ingen klimatpremie antas för en 80% dyrare maskin ligger break-even punkten vid åtta år - i sådant fall är el- och dieseldriven hjullastare kostnadsmässigt lika över åtta år.



Figur 4.11: Känslighetskalkyl för annat pris hjullastare

4.2.4 Framtida drivmedelpriser

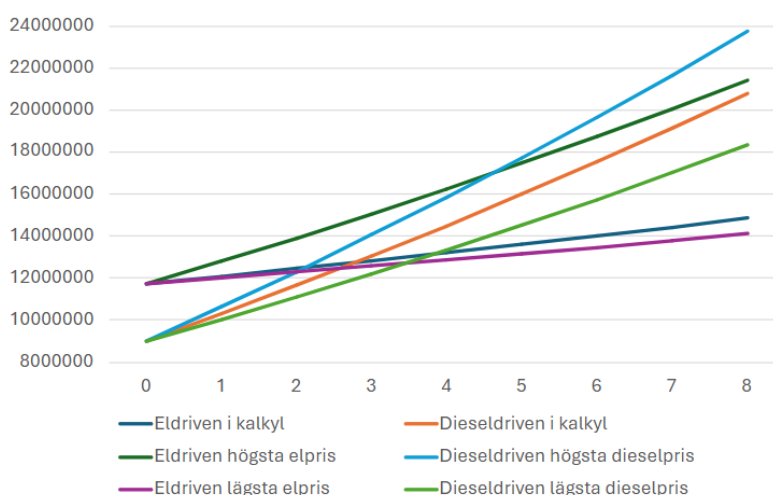
Som nämnt i avsnitt 2.2.2 finns det ett flertal faktorer som kan förändra drivmedelspriserna i framtiden. Vidare identifierades i avsnitt 4.1 att drivmedelskostnaden utgör en stor andel av den totala kostnaden vilket gör att en förändring i bränslekostnad kan få en betydelse för slutresultatet (se figur 4.5). Med hänsyn till detta görs en känslighetsanalys där elpriset antas kunna variera upp till fyra gånger högre än grundantagandet på 0,725 sek/kWh som använts i kalkylen. Detta värdet antas utifrån tillgång och efterfråga på el som en resurs som är svårlagrad och därmed mer påverkad av rådande efterfråga - som stiger med ökad elektrifiering. Priset på HVO100 antas inte ha lika stor varians, utan förväntas som mest öka eller minska med 25 % från grundantagandet på 17,125 sek/L som använts i kalkylen. Resultatet illustreras i figur 4.12.



Figur 4.12: Påverkan av drivmedelpriser på totala drivmedelkostnaden

Prisvariationerna påverkar den totala kostnaden för drivmedel, och under flera år kan det leda till en betydande förändring i den totala kostnaden. Vid en jämförelse mellan det lägsta och högsta HVO-priset kan bränslekostnaden för hjullastaren, som var den maskin med högst drivkostnad, variera med över fem miljoner kronor (se figur 4.12). Detta beskriver en förändring av originalpriset med 25%, eventuellt kan en framtida förändring av priset bli ännu högre.

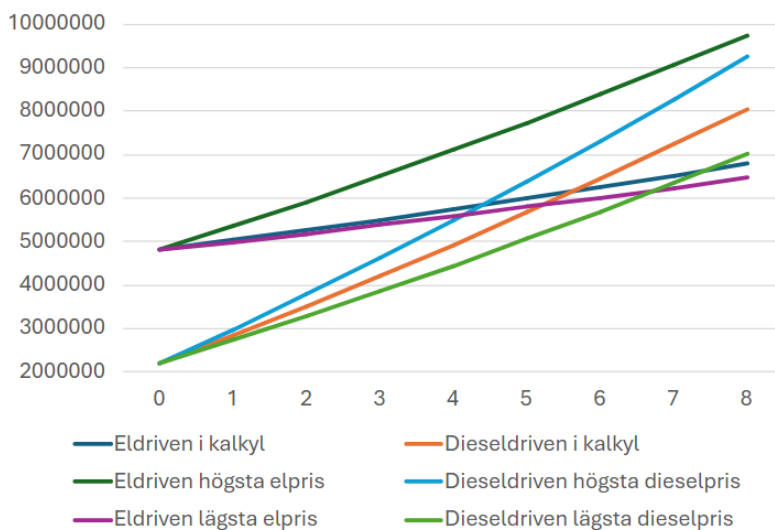
Variationen i drivmedelpris påverkar den totala livscykelkostnaden för både hjullastaren och lastbilen. För hjullastaren är priset för de olika eldrivna alternativen till stor del lägre än för de dieseldrivna (se figur 4.13). Men om elpriset ökar och dieselpriset minskar i framtiden kan det dieseldrivna alternativet vara kostnadsmässigt lönsammare.



Figur 4.13: Påverkan av drivmedelpriser på totala kostnaden för hjullastaren

För lastbilen är drivmedelspriset och dess påverkan på den totala kostnaden nära för de olika alternativen (se figur 4.14). Break-even punkten ligger som tidigast efter fyra

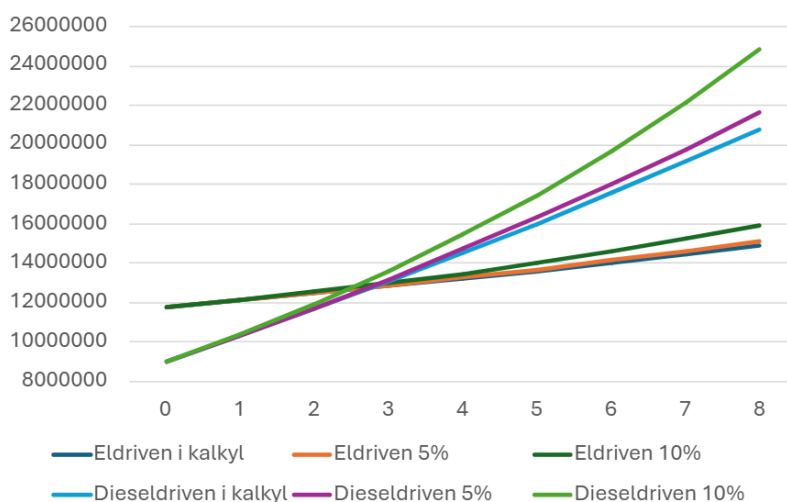
år och variationer i drivmedelpris kan göra både det eldrivna och det dieseldrivna alternativet till det kostnadsmässigt lönsammaste.



Figur 4.14: Påverkan av drivmedelpriser på totala kostnaden för lastbilen

4.2.5 Känslighetsanalys diskonteringsränta

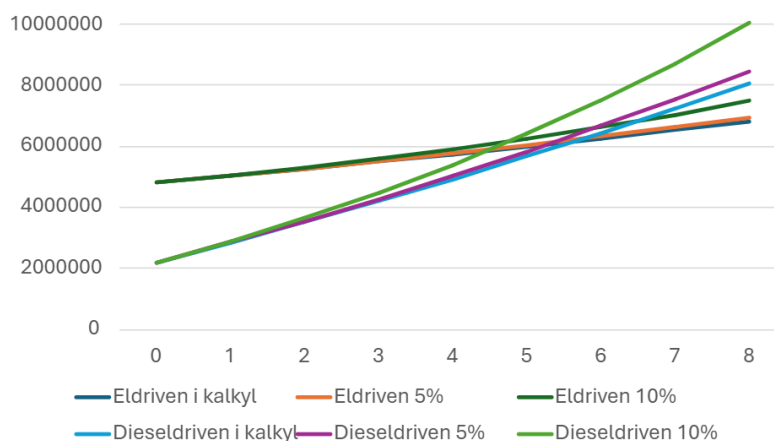
För att spegla skillnader i kostnader och risk mellan samhälle och enskilda aktörer genomfördes en känslighetsanalys med alternativa räntor. I kalkylen används diskonteringsräntan 3.5 % (se avsnitt 3.2.6), men vid andra räntesatser förändras de löpande kostnaderna och då även de totala kostnaden. Därför har räntesatserna 5% och 10% undersökts i figur 4.15 och 4.16. För hjullastaren (figur 4.15) påverkas inte break-even punkten mycket utan ligger fortfarande runt 2-3 år oavsett diskonteringsränta.



Figur 4.15: Påverkan av diskonteringsränta för hjullastare (kr)

För lastbilen (figur 4.16) kan en ökning i diskonteringsränta medföra att break-even punkten sker ett år tidigare (runt 4-5 år istället för 5-6 år). En högre kalkylränta

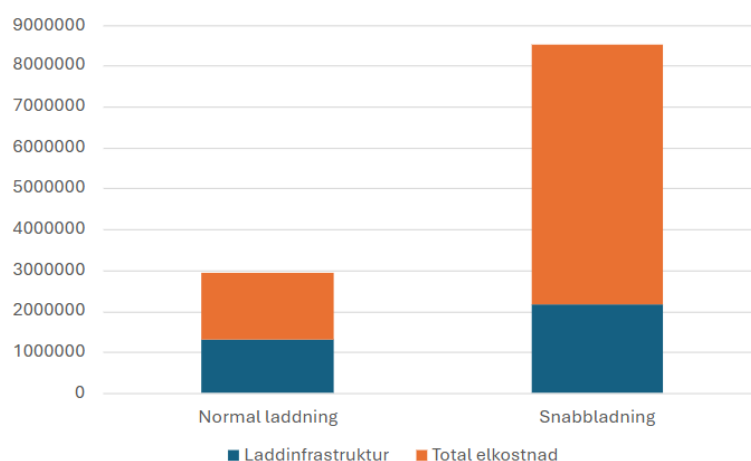
medför att för både hjullastaren och lastbilen så ökar skillnaden i totala kostnader över åtta år, vilket kommer av att de dieseldrivna alternativen har högre löpande kostnad och därmed påverkas mer av räntesatsen.



Figur 4.16: Påverkan av diskonteringsränta för lastbil (kr)

4.2.6 Snabbladdning

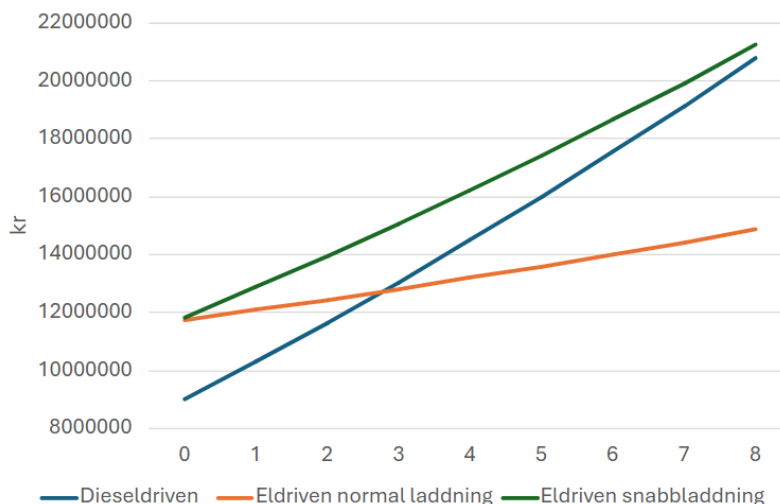
I kalkylen har normal laddning antagits, men snabbladdning är även en aspekt som kan vara relevant vid behov av laddning under dagen. Som beskrivet i avsnitt 2.2.1 så behövs en laddstation med DC-ström vid snabbladdning vilken är drygt dubbelt så dyr som vid normalfallet (som använder AC-ström). Däremot blir inköskostnaden av hjullastaren billigare eftersom ett mindre batteri kan användas. Både kostnaden för laddinfrastruktur och den totala elkostnaden vid snabbladdning ökar vilket visas i figur 4.17. Över åtta år blir skillnaden mellan snabbladdning och normal laddning fem och en halv miljon kronor.



Figur 4.17: Kostnad för normal och snabbladdning för hjullastare

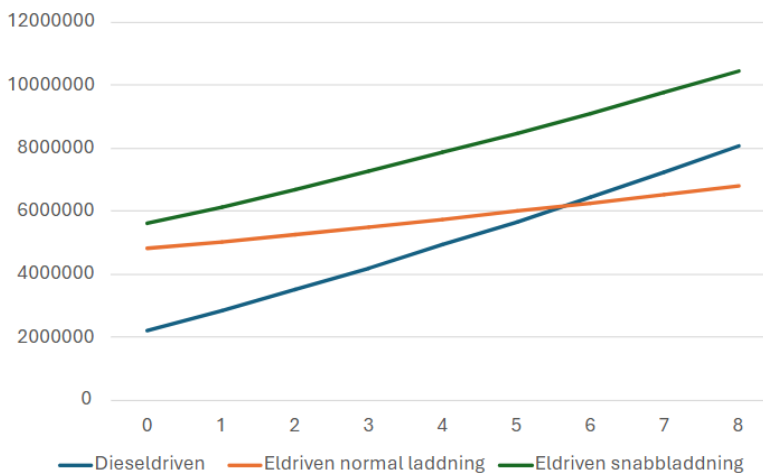
Den högre kostnaden av laddinfrastruktur samt ett högre elpris vid snabbladdning leder till att break-even punkten för den eldrivna hjullastaren flyttas och kostnaden

är något högre än för den dieseldrivna under åtta år, se figur 4.18. Detta är trots att ett mindre batteri har antagits för hjullastaren i exemplet. I känslighetsanalysen framkommer att inköpskostnaden av snabbladdningsstationen är ungefär den samma som den beräknade lägre kostnaden av en hjullastare med ett mindre batteri; initialkostnaden är ungefär den samma för snabbladdningsfallet som normalfallet. Förutom den högre totala kostnaden av elpriset vid snabbladdning skulle laddning under dagen även innebära att nya rutiner krävs, särskilt med hänsyn till att laddningen måste ske utanför tunneln, vilket även skulle bidra till ökade kostnader.



Figur 4.18: Känslighetsanalys över kostnad för normal och snabbladdning för hjullastare

Även för lastbilen har en känslighetsanalys genomförts där användningen av snabbladdning påverkar den totala kostnaden, se figur 4.19. Till skillnad från hjullastaren har inköpskostnaden av en lastbil med ett mindre batteri inte beräknats. I figur 4.19 syns att den totala kostnaden för snabbladdningsalternativet ligger över det för både diesel och normal laddning av el under åtta år.



Figur 4.19: Känslighetsanalys över kostnad för normal och snabbladdning för lastbil

4.3 Ej beräkningsbara effekter

Utöver de kvantifierbara kostnaderna och nyttorna finns även flera effekter som inte prissätts i den ekonomiska analysen ovan, men som ändå kan ha en betydande inverkan. Dessa bör beaktas kvalitativt för att skapa en helhetsbedömning av elektrifieringens kostnader och nyttor. Nedan presenteras dessa olika aspekter.

4.3.1 Arbetsmiljö och hälsorisker

En av de svårberäknande effekterna är förändringar av arbetsmiljön, speciellt när det gäller luftkvalitet. Utsläpp från förbränning av diesel i slutna miljöer såsom tunnlar utgör en hälsorisk för arbetarna. Avgaserna innehåller flera skadliga ämnen såsom kväveoxider, kolmonoxid och partiklar som kan leda till både akuta och långsiktiga hälsorisker. Exponering för dessa ämnen kan leda till irritation i luftvägarna, hjärt- och kärlsjukdomar och ökad risk för lungcancer (Taxell och Santonen, u. å). I analysen har utsläpp av kväveoxid och partiklar värderats ekonomiskt (se tabell 4.7), men kolmonoxid samt flera andra hälsofarliga luftföroreningar har inte inkluderats i den ekonomiska bedömningen vilket bör beaktas.

Elektriska arbetsmaskiner kan minska bullret med 20 - 30 dB jämfört med dieseldrivna (Yang m. fl., 2024). Denna bullerreducering är särskilt viktig i tunnelmiljö där höga ljudnivåer kan utgöra allvarliga hälsorisker. Exponering av buller leda till symptom som allmän störning, koncentrationssvårigheter, sömnproblem, metabola sjukdomar, hjärt- och kärlsjukdomar och psykisk ohälsa (WHO, 2018).

Som ett resultat av minskade utsläpp kan behovet av ventilation vid tunnelarbeten minska vilket i sin tur kan leda till reducerade bullernivåer både på arbetsplatsen och i omgivande områden. Detta är framförallt en fördel i tätbebyggda stadsområden såsom exempelvis vid byggandet av Västlänken (A. Johansson, personlig kommunikation, 26 februari 2025).

Sammanfattat innebär övergången till eldrivna maskiner betydande förbättringar av arbetsmiljön, vilket kan bidra till bättre arbets säkerhet och välmående på arbetsplatsen. Detta kan i förlängningen bidra till färre sjukskrivningsdagar och förtidspensionering och bättre produktivitet på arbetet.

4.3.2 Brandrisk

Vid en övergång till elektrifierade arbetsmaskiner ändras kraven och riskbilden på arbetsplatsen, framförallt kopplad till säkerhetsutmaningar med batterier. Litiumbatterier är idag den dominerande batteritypen som används till eldrivna fordon, främst för deras höga effekt- och energidensitet jämfört med andra batteriteknologier (Q. Wang m. fl., 2019). Trots dessa fördelar har batterierna en relativt låg termisk stabilitet, vilket innebär att batteriet kan bli instabilt vid termisk påverkan, meka-

nisk skada eller elektriska felbelastningar. Detta kan leda till att batteriet ventilerar gaser, utvecklar rök, fattar eld eller i extrema fall exploderar (H. Wang, 2025). Bränder i batterier är ovanliga, men det är framförallt släckningsarbetet utgör den största utmaningen - det kan kräva stora mängder vatten och branden kan pågå under lång tid med risk för återantändning (Sturm m. fl., 2022). Detta är särskilt problematiskt i slutna anläggningar såsom tunnlar, där begränsad ventilation, svår evakuering och begränsad framkomlighet för räddningstjänst kan förvärra konsekvenser av olyckan.

Utöver den direkta risken för personskador kan en batteribrand i undermarksanläggningar få allvarliga miljömässiga ekonomiska följder. Vid batteribrand avges giftiga ämnen som kan förorena framför allt luft, men även mark och vatten (Sturm m. fl., 2022). En brand kan även orsaka stora skador, långa driftstopp, höga kostnader för sanering och reparation samt betydande förseningar i projektet (Ingason m. fl., 2015).

Sammanfattningsvis finns det många identifierade risker som användning av batterifordon innebär. Dessa risker blir extra problematiska när batterierna placeras i tunnelanläggningar. För att branschen skall våga ställa om till batteridrivna fordon i tunnelanläggningar krävs det att riskerna undersöks vidare och att de eldrivna maskinerna jämförs med de dieseldrivna. Detta kräver stora ekonomiska resurser samtidigt som det är en fråga om vem som ska finansiera arbetet.

4.3.3 Andrahandsmarknad

I denna analys har värdet för maskinernas potentiella andrahandsmarknad inte tagits i beaktning. Konventionella arbetsmaskiner har en väletablerad andrahandsmarknad, medan motsvarande marknad för dess elektriska motsvarigheter fortfarande befinner sig i ett tidigt skede, vilket gör det svårt att prissätta dessa (SWECO, 2023). Eftersom elektriska maskiner har färre rörliga delar kan en förlängd livslängd antas jämfört med dieseldrivna alternativ vilket skulle kunna leda till mer av en andrahandsmarknad än dieselalternativen (California Department of Transportation, 2024).

Andrahandsvärdet av en maskin kan utgöra en stor del av maskinens totala livscykelkostnad (Myhrberg och Ricknell, 2024), och vid en förlängd livslängd så kan den initiala kostnaden räknas över flera år och således minskar den årliga kostnaden. Samtidigt minskar batteriets prestanda över tid (Rahman och Alharbi, 2024) vilket kan bidra till att andrahandsintresset för eldrivna maskiner blir lågt. Hur andrahandsmarknaden utvecklas över tid kommer alltså påverka den totala lönsamheten över hela livscykeln.

4.3.4 Övriga effekter

En övergång från dieseldrivna till elektriska fordon vid utlastningsfasen i arbete i bergtunnel kommer leda till ett ökat behov av laddinfrastruktur samt ett ökat energibehov. För att säkerställa en hållbar omställning krävs det att energibehovet

kan mötas med förnybart producerad el för att bidra till en minskning av utsläpp. Speciellt för att lastbilar i tunnelarbeten ska kunna elektrifieras krävs en systemomställning av den befintliga infrastrukturen, då det krävs laddstationer på fler platser än endast arbetsplatsen. Kostnaden för dessa effekter har ej inkluderats i analysen.

Vid en övergång till elektriska maskiner krävs ny kunskap som måste förvärvas, tillämpas och spridas inom branschen. Detta medför ökade kostnader vilka inte har inkluderats i analysen.

Dessutom finns det fler parametrar som i detta projektet antagits eller avgränsats, exempelvis likvärdig prestanda mellan eldrivna och dieseldrivna alternativ, vilket i verkligheten inte stämmer. Att dessa parametrar utelämnats bör beaktas.

4.4 Samtida syn på elektrifiering av arbetsmaskiner

I den ekonomiska analysen framkom att elektriska arbetsmaskiner inte bara är fördelaktiga ur ett långsiktigt kostnadsperspektiv, utan även bidrar till förbättrad arbetsmiljö och minskade klimatutsläpp. Trots dessa fördelar befinner sig omställningen till eldrivna maskiner i utlastningsfasen fortfarande i ett tidigt skede. Detta avsnitt syftar därför till att undersöka och identifiera utmaningar kopplade till denna övergång, och har genomförts bland annat genom intervjuer med aktörer. Vidare undersöks fördelar aktörerna ser med en omställning till eldrivna maskiner.

4.4.1 Ekonomiska hinder

Inom branschen finns flera elektrifierade maskiner, särskilt i de mindre storleksklasserna (Trafikverket, 2024b), men dessa är fortfarande avsevärt dyrare än motsvarande förbränningsmotordrivna maskiner (Käck och Jansson, 2024, se även avsnitt 4.1, samt avsnitt 2.2.1). I intervjuerna framkom det att denna förhöjda investeringskostnad (se figur 4.3) är en stor utmaning för entreprenörerna när det kommer till att kunna investera i eldrivna fordon (R1-R3). Detta är ett särskilt stort problem i de fall då det är underentreprenörer som äger maskinerna, då dessa aktörer har små marginaler i sina anbud till huvudentreprenörer och på så sätt har svårt att investera i dyrare maskiner (Käck och Jansson, 2024).

Vidare gäller att arbetsplatserna vid tunnelbyggnad är tillfälliga och att det på så sätt kan vara svårt att säkra tillräcklig elförsörjning (Mawdsley och Helbig, u. å). R1 ser också ett problem med att arbetsplatsen är tillfällig och jämför med gruvindustrin, där elektrifieringen har kommit längre. Enligt respondenten beror detta på att gruvor är mer stationära och används under lång tid, medan tunnelprojekt oftast pågår i endast 1-2 år. Den korta projekttiden gör det svårare att finansiera och räkna hem investeringen i elektriska maskiner och i laddinfrastruktur. Även R3 påstår att längre kontrakt är avgörande för att dem ska våga investera i elektriska maskiner. Vidare förklarar R2 från deras maskinuthyrarperspektiv hur de högre in-

köpskostnaderna innebär högre hyrkostnader för deras kunder vilket kan innebära att efterfrågan minskar.

Inom branschen upphandlas projekt vanligtvis var för sig och av olika aktörer vilket skapar en kortsiktighet i investeringar (Trafikverket, 2024b). Detta gäller speciellt då priset har en central roll i upphandlingar och på så sätt skapar små marginaler för aktörerna. Alla intervjuade aktörer beskriver hur pris är den avgörande faktorn vid upphandlingar. Vidare instämmer alla respondenter att långsiktiga kravställning från beställare samt möjlighet till ekonomiska bidrag är viktigt för att de ska ställa om.

Utöver kostnader för aktörer är det kostsamt för samhället att implementera laddinfrastruktur för att möjliggöra elektrifiering (Trafikverket, 2024b). Alla respondenter påstår att det råder brist på lättillgänglig laddinfrastruktur och att det är en utmaning för införandet av eldrivna maskiner. R3 menar att oförutsägbara ruttor utgör ett hinder för elektrifiering av lastbilar. Exempelvis förklarar respondenten att lastbilar som kör samma sträckor dagligen är betydligt enklare att planera för, till skillnad från fordon som har varierande körningar varje dag. Detta gör att produktionsförluster riskerar att uppstå. Tungt lastade lastbilar behöver dessutom laddas under arbetsdagen eftersom räckvidden inte är tillräcklig för ett helt arbetspass. Laddning under dagtid medför dock flera utmaningar. Dels är elpriset högt under dagen och det kräver även tillgång till snabbaddning, vilket innebär ytterligare kostnader jämfört med normal laddning vilket R3 ser som utmanande.

4.4.2 Tekniska hinder

Arbete i tunnelmiljö karaktäriseras som ett krävande arbete som kräver stora maskiner med hög kapacitet. Alla respondenter påstår att dagens batterikapacitet är för liten för att klara av den högt ställda kravbild som finns vid utlastning. Samtidigt förklarar R1 att det rent teoretiskt hade kunnat få plats två mindre maskiner i bred i tunneln, men att detta inte är önskvärt då hög kapacitet är ett måste. Vidare förklarar R1 och R2 hur eldrift är praktiskt vid stationära moment, såsom exempelvis borrhjulen, då kabelanslutning kan användas. Men detta beskrivs inte som möjligt vid mer mobila moment, såsom arbete i utlastningsfasen.

Samtidigt beskrivs korta ledtider som ett hinder för att implementera de systemlösningar som krävs vid en elektrifierad drift (Trafikverket, 2024b). Därtill tar det tid att säkerställa tillgången till nödvändiga nollutsläppsfordon. Det befintliga systemet, som arbetsmaskinerna är en del av, är idag utformat och optimerat för fossildrift. (Käck och Jansson, 2024). Vid en övergång till eldrift efterfrågas dock samma prestanda och driftstider till en likvärdig kostnadsnivå vilket kan vara svårt att uppnå i nuläget. Denna bild bekräftades även vid intervjuerna med de olika aktörerna i branschen.

Även Naturvårdsverket har nyligen identifierat hinder för omställningen till noll-

utsläppsmaskinens kopplat till ladd- och tankinfrastruktur för att på sikt kunna främja en omställning (2025). De hinder som identifieras i studien är, utöver höga investerings- och driftkostnader jämfört med dieseldrivna fordon, även stora kostnader och risker kopplade till teknikutveckling och nödvändiga systemlösningar. Även låg efterfrågan och begränsad information om upphandling är en utmaning samt svårtolkade regelverk och brist på kunskap och erfarenhet i sektorn kring prestanda, kostnader och regelverk.

Daglig laddning av elektrifierade arbetsmaskiner innebär även logistiska utmaningar, särskilt i tunnelmiljöer. R2 förklarar att laddning inte kan ske inne i tunneln på grund av den förändrad brandrisken som inte är helt kartlagd ännu. Detta innebär att maskinerna måste tas ut för laddning vilket försämrar produktiviteten och därmed inte gör laddning under arbetsdagen till ett realistiskt alternativ. R1 instämmer i denna bedömning och betonar vikten av att undersöka frågan mer för att möjliggöra en omställning. Som nämnt i avsnitt 2.3.4 tillkommer det nya krav och säkerhetsutmaningar vid batteridrift i tunnlar som innebär kostnader vilket R2 instämmer med. Vidare förklarar respondenten hur det ställs nya krav på maskinens utformning och säkerhetsutrustning. De nämner ett fall där en eldriven maskin behövde utrustas med ett sprinklersystem i motorrummet samt tre brandsläckare för att vara godkänt för användning i tunnlar.

Förutom ett utökat säkerhetssystem innebär elektrifieringen av arbetsmaskiner att nya roller och aktörer behöver tillsättas (Käck och Jansson, 2024). Dessa behövs exempelvis för att tillhandahålla lösningar för laddinfrastruktur, uthyrning och service av batterier samt för att utveckla nya tjänster på energimarknaden. Införandet av dessa nya roller tar tid.

Vidare beskriver R1 att deras organisation inte ställer högre krav på sina underleverantörer än vad Trafikverket ställer på dem gällande hållbarhetsaspekter. Samtidigt beskriver R1 vikten av att inledningsvis genomföra elektrifiering inom mindre projekt innan man tar sig an större satsningar, såsom Västlänken. Detta kan relateras till begreppet "first-mover disadvantage", som syftar på nackdelarna med att vara först med att implementera ny teknik då detta innebär stora investeringar i tid, kapital och kompetens för att kunna använda tekniken effektivt (Trafikverket, 2024b). Denna nackdel blir särskilt påtaglig i en bransch med hög konkurrens och små ekonomiska marginaler, vilket de intervjuade aktörerna menar kännetecknar deras bransch.

4.4.3 Fördelar med elektrifiering av arbetsmaskiner

I avsnitt 4.3.1 presenterades att en omställning till eldrivna fordon skulle innebära fördelar såsom minskade utsläpp, förbättrad luftkvalitet och mindre buller. Detta är något som alla respondenter lyfter och ser som en drivkraft. R1 nämner även de nya gränsvärdena för arbete i undermarksanläggningar (presenterade i avsnitt 2.4.1) som träder i kraft 2026 och hur dessa kan tänkas påskynda en övergång till

nollutsläppsfordon. Vidare beskrivs i avsnitt 2.1.1 hur arbetet i tunneln är begränsat tidsmässigt på dygnet för att inte överstiga regler för bullernivåer. R3 beskriver hur elektrifierade lastbilar har möjliggjort att de kan utföra arbete nattetid i stadsmiljö. R1 menar dock att vinsterna från bullerminskning vid arbete i tunnel är små, då bullernivån redan är mycket hög på grund av moment såsom sprängning och lastning. Samtidigt betonas att omställningen måste vara inom möjlig prisbild. Därtill ser alla respondenter de minskade bränslekostnaderna vid eldrift, som går att se i avsnitt 4.1, som en drivkraft för att ställa om. Samtidigt är kostnadsbesparingarna ur bränslesynpunkt som störst på stora maskiner, där utbudet idag är som lägst (Trafikverket, 2024b). Detta kan ses som en slags inlåsning på marknaden.

Avslutningsvis råder det en stor osäkerhet kring hur elektrifieringens faktiska kostnader och effekter ska beräknas (Käck och Jansson, 2024). De intervjuade entreprenörerna uppger att det i dagsläget är svårt att avgöra om investeringar i elektriska fordon är lönsamma. Exempelvis råder det stor osäkerhet kring andrahandsvärdet på elektriska arbetsmaskiner samt huruvida den högre investeringskostnaden kan kompenseras av lägre driftskostnader. Denna osäkerhet bidrar till att många entreprenörer avstår från att investera i den nya tekniken. Samtidigt lyfter R3 att branschen de arbetar inom är traditionell och att inställningen till nya elektriska alternativ kan vara negativ.

5

Diskussion

Med kostnadsnyttonalysen samt intervjuerna som grund har driften vid tunnelbygge undersökts utifrån användningen av eldrivna- samt dieseldrivna arbetsmaskiner. Både möjligheter och utmaningar har uppmärksammats med de olika maskinerna utifrån dagens förhållande. Nedan reflekteras över det resultat som framkommit i analysen med fokus på ekonomiska, miljömässiga och praktiska aspekter av elektrifiering av utlastningsfasen i tunnelprojekt. Även studiens begränsningar presenteras samt förslag på vidare studier.

5.1 Ekonomiska förutsättningar och osäkerheter

Resultatet, i linje med tidigare studier och utförda intervjuer, visar att inköpskostnaden för elektriska maskiner är högre än för dieseldrivna. I analysen har initiala kostnaden för den elektriska hjullastaren uppskattats vara ungefär 32% dyrare än en dieseldriven maskin. För lastbilen har inköpspris hämtats från återförsäljare och den elektriska motsvarigheten visade sig vara ca 77 % dyrare exklusive bidrag. I en tidigare studie av Yang m. fl. (se avsnitt 1.2) visade sig den initiala kostnaden för en elektrisk hjullastare vara ca 50% gånger högre jämfört med motsvarande dieseldrivna alternativ. Dock är det viktigt att notera att maskinerna i den studien är i mindre storleksklass än de som analyseras i denna rapport. Utifrån detta framstår kostnaden för den elektriska hjullastaren vara oväntat låg. Detta kan bero på osäkerheter i underlaget, eftersom det i dagsläget inte finns maskiner i denna storleksklass och priset därför har uppskattats utifrån data och prestanda från tillgängliga dieselalternativ och dagens batteripris. En annan möjlig förklaring till detta resultat är att inköpspriset på den elektriska hjullastaren baseras på ett antagande att kostnaderna är desamma som för dieselmaskinen, förutom kostnaden av motorlösningen som baserades på egna uppskattningar (se avsnitt 3.2.1). Detta skulle kunna leda till att prisskillnaden mellan el- och dieselhullastare underskattas i analysen. Eftersom tekniken inte är fullt etablerad, bör resultatet för hjullastaren tolkas med viss försiktighet. Detta visar behovet av mer tillförlitlig och jämförbar data för att kunna dra säkrare slutsatser kring kostnadsbilden vid elektrifiering av större maskiner.

Utöver högre initialkostnader vid eldrift visar resultatet att de löpande kostnaderna utgör en betydligt större del av de totala kostnaderna för dieselmaskinerna jämfört med elmaskiner (se figur 4.4), samt att de löpande kostnaderna främst beror på de högre drivmedelskostnaderna. I denna analys minskar de totala drivmedelskostnaderna med ungefär 83-84 % vid övergång till eldrift under maskinernas livstid. Den

tidigare nämnda svenska studien i avsnitt 1.2 utförd av SWECO visar att skillnaden i drivmedelskostnaderna mellan el och HVO100 - det drivmedel som använts i denna analys - uppgick till ungefär 55 % skillnad till elens fördel. Detta resultat är mer jämförbart med det framtaget i denna rapport och en möjlig förklaring till skillnaden är att studierna utgår från olika antaganden om drivmedelspriset och maskiner med olika storlek och därmed olika drivmedelsförbrukning.

Resultatet i avsnitt 4.1 understryker därför vikten att inte enbart fokusera på inköpskostnaden vid ekonomiska jämförelser av elektrifierade maskiner, utan att istället beakta alla kostnader under hela maskinens livscykel. Ett sådant perspektiv kan vara särskilt viktigt i projekt med hög maskinanvändning eller längre tidsramar. Detta då studiens resultat visar att elektriska hjullastare och lastbilar på sikt kan vara mer kostnadseffektiva, med en kostnadsbesparing på 28% respektive 15 % på åtta år (se figur 4.1, 4.2). Resultatet överensstämmer i stora drag med studien gjord av Yang m. fl., vilken visade en kostnadsminskning med 20 % vid eldrift för en hjullastare under studiens provperiod. Samtidigt avviker resultatet från studien gjord av SWECO, där eldrift istället resulterade med en kostnadsökning på 24 % över tiden för ett vägprojekt. Skillnaden kan förklaras av olika antaganden, där den senare studien antagit inköpspris för elmaskiner motsvarande 2,5 gånger inköpspriset för dieselmaskiner. Studien har även inkluderat kostnaden för ett batteribyte på 40 % av inköpskostnaden. Därutöver har dessa studier inte tagit i beaktning de samhällseliga kostnaderna som tillkommer vid användning av de olika maskinerna, och det kan ses som en ytterligare förklaring till skillnaderna i resultatet.

Den minskade driftkostnaden vid eldrift kan vara en drivande faktor för omställningen. I avsnitt 4.4.3 framgick att det är den slutliga ekonomiska lönsamheten som framförallt avgör om elmaskiner är ett realistiskt alternativ att investera i. Entreprenörer ser drivmedel som en stor utgiftspost och en kostnad som går att spara in på vid en omställning. Detta perspektiv kan i sin tur bidra till att det elektriska alternativet framstår som mer konkurrenskraftigt för entreprenörer. Det bör dock noteras att resultaten bygger på antaganden om drivmedelskostnaden, och känslighetsanalysen som genomfördes i avsnitt 4.2.4 visar att variationer i bränslepris kan ha stor inverkan på den ekonomiska kalkylen. De olika scenarierna som jämförts visar att förändringar i drivmedelskostnaden kan leda till en förskjutning av tidpunkten då eldrivna maskiner uppnår sin ekonomiska brytpunkt i jämförelse med diesel - i vissa fall med några år. Det är även viktigt att understryka att vid högre nyttjandegrad, i form av exempelvis fler skift eller längre arbetspass, ökar behovet av snabbladdning vilket innebär högre driftkostnader. I avsnitt 4.2.6 analyserades drift med endast snabbladdning och det visade sig att eldrift under sådana förutsättningar inte var ekonomiskt lönsamt jämfört med ett dieseldrivet alternativ. Detta visar att valet av drifttid och laddningstyp är avgörande för den totala kostnadsbilden och att en balans mellan normal- och snabbladdning kan behövas vid längre drifttid för att eldrift skall kunna vara ekonomiskt lönsammare än diesel. Samtidigt hade inköpspriset för en maskin med snabbladdningsmöjligheter kunnat vara lägre då den inte kräver lika stor batterikapacitet eftersom laddning kan ske oftare. Dessa aspekter är ett exempel på det som lyfts i avsnitt 4.4.2, där aktörerna anser att det råder

osäkerheter kring hur elektrifieringens faktiska effekter och kostnader skall beräknas och att det därmed blir svårt att avgöra om eldrift blir ekonomiskt fördelaktigt.

Det är dock viktigt att poängtera att de drivmedelspriser som använts i kalkylen, och redovisas i avsnitt 3.2.2, är hämtade från ASEK:s kalkylbilaga där samhällsekonomiska värden presenteras. Dessa priser är utan skatter och avgifter och har använts för att skapa en konsekvent och jämförbar analys mellan de olika fallen i studien. Detta medför att totala bränslekostnaden för enskilda aktörer i ett verkligt scenario skulle vara högre än de som använts i analysen då skatter och avgifter tillkommer. Detta innebär att de löpande kostnaderna och då även de totala kostnaderna skulle öka för båda alternativen. Det i kombination med en förhöjd diskonteringsränta, som undersöktes i avsnitt 4.2.5, gör att de löpande kostnaderna kan öka än mer i ett verkligt scenario.

I avsnitt 4.2.2 undersöktes hur lönsamheten förändrades om subventioner och bidrag förändras. Analysen visade att om bidragen togs bort försköts break-even punkten med ett och ett halv år för hjullastaren och ett halvt år för lastbilen. För hjullastaren utgör klimatpremien en betydande del av inköpskostnaden och bidrar till att maskinen snabbare når ekonomisk lönsamhet, vilket gör eldrift till ett mer attraktivt alternativ för entreprenörer. Dock visades i analysen att över åtta år var de eldrivna alternativt billigare även om bidrag skulle exkluderas, trots detta påpekade aktörerna att bidrag är viktiga för att de ska kunna ställa om.

Som beskrivet i avsnitt 1.5 har de eldrivna maskinerna antagits vara likvärdiga dagens dieseldrivna i fråga om produktivitet vid drift. I dagsläget medför dock säkerhetsrestriktioner att laddning måste ske utanför tunneln, vilket innebär ett extra moment för transport och därmed potentiella produktionsförluster. Detta ansågs vara ett stort hinder för entreprenörerna (se avsnitt 4.4.2). I takt med att tekniken utvecklas, och om brandrisker kan hanteras mer effektivt i framtiden, kan dessa begränsningar minska eller försvinna. En extra halvtimme har antagits för att beräkna produktionslusten, men detta tar endast med den ökade elkostnaden. Analysen frånsär från utökade lönekostnader, schemaomläggning eller behov av inköp av ytterligare maskiner samt andra aspekter som tillkommer av en förändrad drifttid.

I analysen har endast ett fordon utefter de två fordonstyperna undersökts, vilket innebär att en laddstation har beräknats per fordon. Investeringskostnaden för laddinfrastrukturen är stor och uppgick till 1,2 miljoner kronor för lastbilen och 1,3 miljoner kronor för hjullastaren, baserat på värden i avsnitt 2.2.1. Det är dock viktigt att poängtera att denna kostnad per fordon minskar vid en större investering i en elektrisk maskinpark, eftersom maskinerna inte behöver en laddstation var utan kan istället dela på den befintliga laddinfrastrukturen.

5.2 Teknikens begränsningar och möjligheter

I analysen antogs det att dieseldrivna och elektriska maskiner har samma lastkapacitet och att inga produktionsförluster uppstår, men i dagsläget finns inte elektriska

maskiner som är helt likvärdiga de dieseldrivna. Som nämnt i kapitel 2.1.2 visar en närmare granskning att drifttid och lastkapacitet skiljer sig vid diesel- och elmaskiner. För lastbilar antas lastkapacitet vara likvärdig, men räckvidden kortare. Med tyngre last ökar energibehovet, vilket leder till större laddningsbehov och kortare räckvidd. Detta utgör en av flera utmaningar med elfordon. Två aktörer lyfter denna aspekt (se avsnitt 4.4.1), där bristande laddinfrastruktur, tillfälliga arbetsplatser och oförutsägbara rutter pekas ut som stora logistiska utmaningar vid en övergång till eldrift. Detta medför att den praktiska genomförbarheten ofta blir osäker och för många aktörer kan det bli en tröskel för investering i eldrift, trots att det skulle kunna vara ekonomiskt fördelaktigt på sikt. Skopvolymen och lyftkapaciteten för hjullastaren skiljer sig i dagsläget med några ton mellan diesel och elmaskiner, vilket innebär att fler lyft krävs med elmaskiner (se avsnitt 2.1.2). Detta kan leda till behov av fler maskiner eller längre arbetstid för att lasta ut material, vilket kan medföra högre kostnader samt produktionsförluster och därmed större motstånd för omställning till eldrift.

Det pågår forskning kring eldrift (se avsnitt 2.2.2), och historiskt sett har tekniken utvecklats kontinuerligt. Det är därför sannolikt att framtida innovationer kommer minska dagens huvudsakliga skillnader mellan el- och dieseldrift när det gäller batteri- och lastkapacitet samt räckvidd. Exempelvis kan batterier med högre energitäthet och kortare laddningstider leda till förbättrad prestanda och ökad användbarhet. Parallellt pågår en omfattande utbyggnad av laddinfrastruktur för elfordon vilket förväntas underlätta dagens logistiska utmaningar och bidra till att öka elfordonens flexibilitet vid drift. Denna utveckling indikerar att eldrift har potential att bli ett mer fullvärdigt och konkurrenskraftigt alternativ till diesel, även inom mer krävande tillämpningsområden som byggsektorn.

5.3 Miljömässiga och sociala aspekter

Resultatet av studien visade att elektrifiering av arbetsmaskiner har potential att minska klimatbelastningarna och förbättra arbetsmiljön på platsen. Som visas i figur 4.8 minskar koldioxidutsläppen med 75 % för hjullastaren och 70% för lastbilen vid en övergång till eldrift. Resultatet går att jämföra med den tidigare beskrivna studien Hållbar TunnEL i avsnitt 1.2, där elektrifiering av utlastningsmomentet uppskattningsvis kunde minska utsläppen utav fossil koldioxid med upp till 50%. Skillnaden mellan resultaten kan motiveras med olika metodval: i denna analys används genomsnittliga uppskattningar av avgaser från maskiner baserat på motorns effekt och endast ett fordon analyseras, medan i Hållbar TunnEl undersöks totala avgasutsläpp från dieselmaskiner i hela tunneln.

Det nya gränsvärdet för utsläpp av dieselavgaser i tunnelmiljöer som träder kraft 2026 kan komma att öka behovet av ventilation och påskynda en omställning till nollutsläppsfordon vilket en entreprenör påpekar i avsnitt 4.4.2. Vid behov av ökad ventilation påverkas inte endast den enskilda aktören utan även närliggande område och befolkning av ökat buller. En övergång till eldrivna maskiner har potential

att minska ventilationsbehovet och samtidigt minska bullernivåerna i arbetsmiljön (se avsnitt 2.3.2 och 4.3.1). Samtidigt visades i figur 4.7 att luftföroreningar värda ungefär en halv miljon kronor per maskin försvinner vid eldrift, vilket tyder på en förbättrad arbetsmiljö. Dock råder det osäkerheter i hur stora arbetsmiljövinsterna är då tunnelmiljön beskrivs av entreprenörerna som en högljudd och dammig miljö.

I avsnitt 2.3.1 beskrevs hur koldioxidutsläppen för HVO100 varierar beroende på tillverkningsmetod och råvaror samt att kostnaden för bränslet beror på ett flertal olika faktorer. Det är möjligt att tillgängligheten till biodrivmedel kan öka i framtiden och på så sätt sänka priset samtidigt som utsläppen vid produktion kan minska. På så sätt hade dagens förbränningsmaskiner även kunnat vara ett alternativ i framtiden, särskilt vid stränga tidskrav då befintliga maskiner kan gynnas då de garanterat uppnår tillräcklig prestanda. Dock betraktas HVO100 som en begränsad resurs med konkurrerande användningsområden och inom många sektorer styrs utvecklingen mot långsiktiga lösningar baserade på el. Vidare ansåg de intervjuade entreprenörerna att en långsiktig kravställning från beställaren (exempelvis Trafikverket i fallet Västlänken) var väsentligt för dem när det gäller omställningen (se avsnitt 4.4.1).

För värdering av utsläppen av både koldioxid och olika partiklar användes åtgärds-kostnadsprincipen samt skadekostnader från ASEKs kalkylbilaga (se avsnitt 3.1). Dessa värden är dock osäkra över tid och kan tänkas förändras i framtiden samt även variera beroende på den metod som används vid framtagning av värdet. I den ekonomiska analysen togs endast utsläpp av partiklar och kväveoxider med vid bedömning av hälsorisker. Som nämnt i avsnitt 4.3.1 är det dock viktigt att notera att det finns flera andra utsläpp som påverkar både människors hälsa, särskilt för dem som arbetar i tunneln, samt miljön genom exempelvis övergödning och andra biologiska effekter. Många av dessa aspekter har inte inkluderats i analysen, vilket innebär att resultatet kan underskatta de samhällsnyttiga fördelarna med det elektriska alternativet.

Analysen omfattar främst kostnader under användningsfasen, men det tillkommer fler kostnader sett över hela livscykeln, exempelvis miljömässiga kostnader i produktionsfasen samt vid avveckling och återvinning. Genom att inkludera dessa kostnader hade kostnadsbilden för de två olika alternativen kunnat förändras och ge en mer heltäckande bild av deras påverkan. Vid tillverkning av batterier finns även flera etiska aspekter som bör beaktas då brytningen av material sker i områden där man inte kan säkerställa goda arbetsförhållanden samtidigt som miljöpåverkan av aktiviteten kan vara svår att reglera.

5.4 Osäkerheter och framtida utveckling

I denna analys har elektrifierade fordon jämförts med de nuvarande dieseldrivna alternativen då de har utpekats som en viktig lösning för att minska branschens utsläpp, men hur den framtida utvecklingen fortlöper är svårt att förutspå och kan

påverkas av många olika faktorer. Exempel på sådana faktorer är vilka tekniska lösningar andra länder väljer att satsa på eller avstår från av geopolitisk osäkerhet - bland annat kring tillgången på vissa sällsynta jordartsmetaller. En annan möjlig utveckling är att tunnelarbeten influeras av teknik som används i gruvarbete, så att exempelvis batteribyten blir aktuellt.

I dagsläget ställs vissa krav vid upphandling kring arbetsmaskiner (trafikverket ställer exempelvis krav på att endast förnybara bränslen ska användas), men dessa kan utökas och bli mer begränsande i framtiden. Till exempel skulle krav på nollutsläppsfordon kunna ställas, där en ökad efterfrågan kan leda till att en övergång till elektriska maskiner påskyndas. Det finns även risk att styrmedel förändras och att exempelvis klimatpremien tas bort. Andra rimliga scenarier hade kunnat innefatta att koldioxidskatten ökar eller att andra skatter tillkommer för luftföroreningar vilket hade förändrat den ekonomiska kalkylen till fördel för nollutsläppsalternativet. Samtidigt kan särskilda nollutsläppsalternativ subventioneras mer än idag för att möjliggöra en övergång vilket kan få en påverkan på vilken slags teknik som utvecklas vidare och används.

Andrahandsvärdet på maskiner är en viktig faktor för att få en heltäckande bild på maskiners totala livscykelkostnader (se avsnitt 4.3.3), men studien har inte tagit dessa kostnader i beaktning då det råder stora osäkerheter kring eldrivna maskiners andrahandsmarknad. Enligt entreprenörer lyfts osäkerheten som en av faktorerna till att många idag väljer att avstå från att investera i eldrift (se avsnitt 4.4.3). Det finns olika faktorer som kan påverka den framtida andrahandsmarknaden. En aspekt som kan innebära höga kostnader är batteriets försämrade prestanda över tid, vilket kan medföra behov av batteribyte. Detta har beaktats i studien utförd av SWECO (2023), där en batteribyteskostnad på 40 % av maskinens inköpspris, efter fem års användning medräknats. Detta kan påverka andrahandsvärdet för elektriska maskiner och därmed minska deras konkurrenskraft jämfört med diesel. Vidare forskning kring batteriteknik är därför önskvärd för att sänka kostnaderna och förbättra batteriernas prestanda, med målet att göra eldrivna maskiner mer konkurrenskraftiga och attraktiva i jämförelse med dagens dieseldrivna alternativ.

5.5 Begränsningar i analysen

I analysen finns det flera olika avgränsningar, förenklingar och uppskattade värden som bör tas i beaktning när resultatet jämförs med ett verkligt scenario. I avsnitt 4.4.2 beskrivs att det tillkommer fler kostnader vid införandet av ny teknik som inte inkluderats i analysen. Exempelvis har antagits att det finns tillgång till tillräcklig elförsörjning, vilket är en förenkling i analysen och som anses vara en utmaning som kan medföra betydande kostnader enligt entreprenörerna. Dock hade framtida utbyggnad av elnät och effekt på sikt kunnat förenkla införandet av laddinfrastruktur, även vid tillfälliga arbetsplatser. Även fler antaganden såsom att maskinerna har likvärdig prestanda leder till att den verkliga kostnaden underestimeras. I avsnitt 2.3.4 samt i intervjuerna med entreprenörerna belyses även att brandrisken är en

central fråga i omställningen som kan tänkas bli kostsam att undersöka.

Som beskrivet i avsnitt 3.1 är kostnadsnyttoanalysen som genomförts en blandning mellan en samhällsekonomisk och företagsekonomisk analys. Metodiken som har använts, samt många värden som har använts i analysen, baseras på ASEK 8 och dess kalkylbilaga. Det är dock viktigt att poängtera att samhällsekonomiska analyser enligt ASEK inte innefattar rena finansiella transaktioner av pengar, såsom exempelvis skatter och subventioner, vilket har inkluderats i denna analys. Detta har gjorts för att på ett bättre sätt spegla entreprenörernas faktiska kostnader. Samtidigt har syftet med arbetet inte varit att ta fram en totalkostnad för samhälle eller enskilda aktörer utan snarare varit att skapa ett jämförbart underlag mellan eldrivna och dieseldrivna alternativ i utlastningsfasen. På så sätt bedöms att den kombinerade analysmetoden som användes var rimlig för studiens syfte. Dock bör det understrykas att om målet var att skapa en mer precis analys från ett specifikt perspektiv, skulle en mer konsekvent användning av respektive analysmetod användas.

Anledningen till att alla externa aspekter inte värderats, vilket hade varit önskvärt i en samhällsekonomisk analys är att vi i högre grad ville att studien skulle spegla entreprenörens kostnader. Detta då det framgick i intervjuerna att kostnadsfrågan är en viktig aspekt för dem vid en potentiell övergång, se avsnitt 4.4.1. I det avseendet bedömdes att utsläpp av koldioxid samt hälsopåverkan av lokala utsläpp var mest relevanta att inkludera.

Samtidigt är det viktigt att poängtera att alla värdering som gjorts i analysen är uttryckt i relativa kostnader. Det innebär att om syftet varit att exempelvis fokusera på hälsorisker eller koldioxidutsläpp i sig, hade dessa kunnat tilldelas ett högre ekonomiskt värde och därmed påverkat slutsatserna ytterligare till fördel för det elektriska alternativet.

5.6 Vidare studier

Resultatet i denna studie visar att elektrifiering av arbetsmaskiner i bergtunnlar medför både möjligheter och utmaningar. Samtidigt finns det flera potentiella kostnader och nyttor som inte omfattats av denna analys, men som kan uppstå vid en förändrad drift. Dessa aspekter bör därför undersökas vidare i framtida studier.

En av dessa aspekter som identifierats i arbetet var att avskrivningstiden för elektrifierade arbetsmaskiner kan eventuellt vara betydligt längre än för dieseldrivna fordon då det finns betydligt färre rörliga delar i eldrivna arbetsmaskiner och därmed förväntas hålla längre. Detta behöver dock verifieras genom vidare studier, då tillgången på långtidsdata om eldrivna arbetsmaskiner idag är begränsad. Dessutom finns det stor osäkerhet kring hur den framtida andrahandsmarknaden för de eldrivna maskinerna ser ut, detta behöver undersökas vidare för att på ett mer precist sätt se hela kostnadsbilden.

I denna studie har det antagits att hjullastaren laddas med normal laddning, vilket innebär en lägre kostnad jämfört med snabbbladdning. Som beskrivet i avsnitt 4.2.6 blir kostnaden för snabbbladdning 5.5 miljoner dyrare i dagens priser, men därtill tillkommer att inköpspriset för en maskin dimensionerad för snabbbladdning bör vara lägre då den kräver mindre batterilagring. Om snabbbladdning skulle tillämpas under arbetsdagen hade det krävt nya arbetsrutiner, exempelvis att laddning sker under raster för att inte störa arbetet. Dessa aspekter har inte undersökts inom ramen för denna studie och föreslås som framtida forskningsområden.

Analysen har begränsat sig från att ej innefatta lönekostnader. Dock skulle laddning utanför tunneln innefatta uppskattningsvis 0.5h extra arbete varje dag då maskinen måste transporteras ut och in från tunneln. Detta skulle i sin tur innefatta längre arbetsdagar och på så sätt ökad lönekostnad alternativt lägre produktion på en dag. Detta är faktorer som ej värderats men bör tas i hänsyn i framtida studie.

Det batteri som antas i denna studie är troligen mycket stort och troligen tungt. Hur detta påverkar maskinens prestanda och hantering i praktiken ingår inte i denna analys, men bör beaktas i vidare studier.

Vidare har utsläpp från maskinerna i denna studie beräknats med hjälp av maskin- och utsläppsdata. Detta gör att värdena är uppskattade samtidigt som endast utsläpp av koldioxid, kväveoxid samt partiklar har beräknats och värderats. I verkligheten skapas det fler utsläpp som som bland annat skapar ökade hälsorisker. Dessa hälsorisker hade kunnat undersökas närmare och speciellt hade det vart intressant att undersöka hur mycket luftkvaliteten kan förbättras vid användning av eldrivna fordon i tunnelarbeten istället för dieseldrivna då sprängaser och damm fortfarande finns kvar.

6

Slutsats

Sammanfattningsvis finns det flera fördelar med elektrifiering av arbetsmaskiner i tunneldrift, men även hinder som uppstår vid teknikförändring av ett fungerande arbetssätt. Under ett långsiktigt perspektiv på åtta år uppnår de eldrivna alternativen en lägre total kostnad än motsvarande dieseldrivna maskiner. Initialt är kostnaden högre för de eldrivna alternativen, där förutom inköp av maskin även laddinfrastruktur tillkommer. Men då den löpande kostnaden över tid blir högre för de dieseldrivna maskinerna får de en högre total kostnad. Dessutom visar analysen på att en övergång kan innebära mindre utsläpp, som kan förbättra arbetsmiljön och minska klimatpåverkan.

Studien identifierar dock flera praktiska hinder för att elektrifiera utlastningsfasen. Bland annat uppnår eldrivna maskiner ännu inte samma prestanda som de dieseldrivna maskiner som används idag. Det finns också osäkerheter kring brandrisken med batterier i tunnelmiljö. Utöver detta lyfter entreprenörerna utmaningar kopplade till den förhöjda initiala investeringskostnaden samt den omfattande systemomställning som krävs för att möjliggöra eldrift.

Trots många identifierade fördelar som är i linje med de mål som samhället satt upp angående minskade utsläpp och klimatpåverkan så ser flera av aktörerna hinder. För att i framtiden fatta välgrundade beslut krävs därför ytterligare studier gällande, driftsäkerhet, brandrisk, arbetsrutiner och totala livscykelkostnader och utsläpp.

Litteratur

- AFS 2023:12. (u. å). Arbetsmiljöverkets föreskrifter och allmänna råd. www.av.se
- AFS 2023:14. (u. å). Gränsvärden för luftvägsexponering i arbetsmiljön. <https://www.av.se/arbetsmiljoarbete-och-inspektioner/publikationer/foreskrifter/afs-202314/?o=n>
- Burke, A. F., Zhao, J., Miller, M. R., Sinha, A., & Fulton, L. M. (2023). Projections of the costs of medium- and heavy-duty battery-electric and fuel cell vehicles (2020-2040) and related economic issues. *Energy for Sustainable Development*, 77. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2023.101343>
- California Department of Transportation. (2024). Evaluation of Electric Vehicle (EV) Heavy Equipment for Use in Caltrans' Operations Evaluation of Electric Vehicle (EV) Heavy Equipment for Use in Caltrans' Operations WHAT IS THE NEED?
- Electricity. (u. å). Electric Worksite. <https://www.electricitygoteborg.se/sv/byggarbetsplatser/electric-worksite>
- Energimarknadsinspektionen. (2021 december). Elpris. <https://ei.se/konsument/el/elmarknaden/elpris>
- Energimyndigheten. (2023 september). *Drivmedel 2022 – Resultat och analys av rapportering enligt regelverken för hållbarhetskriterier, reduktionsplikt och drivmedelslag*. www.energimyndigheten.se
- Energimyndigheten. (2024a augusti). Klimatpremie. <https://www.energimyndigheten.se/klimat/transporter/transporteffektivt-samhalle/klimatpremie/>
- Energimyndigheten. (2024b). Vägledning för Klimatpremien, miljöarbetsmaskiner. www.energimyndigheten.se,
- Energimyndigheten. (2024c december). Klimatpremie för tunga lastbilar. <https://www.energimyndigheten.se/klimat/transporter/transporteffektivt-samhalle/klimatpremie-for-tunga-lastbilar/>
- Finansdepartementet. (2022 december). Skattebefrielse för rena och höginblandade biodrivmedel till och med 2026 - Regeringen.se. <https://www.regeringen.se/pressmeddelanden/2022/12/skattebefrielse-for-rena-och-hoginblandade-biodrivmedel-till-och-med-2026/>
- Gustavsson Binder, T. (2022). HVO100 - analys av nuläge och framtida utveckling. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1714447/FULLTEXT01.pdf>
- Gustavsson Binder, T. (2024). HVO100 i ljuset av Sveriges och EU:s nya klimatpolitik.
- Heger O, Föbleitner P, Kohl B, Søvik A & Sturm P. (2023). *E39 Rogfast Project – Section E02: Risks with Battery-Electric Transport Vehicles in Tunnel Excavation. Fire Risk and Process Impact Analysis* (tekn. rapport).

- Ingason, H., Vylund, L., Lönnermark, A., Kumm, M., Fridolf, K., Frantzich, H., Palm, A., & Palmkvist, K. (2015). *Taktik och Metodik vid brand i Undermarksanläggningar (TMU) Sammanfattningsrapport* (tekn. rapport).
- Johansson, M., Frosth. Sandra, Robinson, T., & Segerborg-Fick, A. (2021). *BeFo_Rapport_222_web*.
- Kjendseth Wiik, M., Haukaas Jan Ivar Ibsen, N.-O., Lekanger, R., Thomassen Dominique Sellier, R., Olaf Schei, O., & Suul Nullutslippsgravemaskin, J. (2020). *SINTEF FAG*. www.sintef.no/community
- Käck, S., & Jansson, J. (2024). Elektrifierade arbetsmaskiner och deras laddinfrastruktur Delstudie kring läge och utmaningar.
- Lars Arnold. (2022 december). How to Maintain Electric Heavy Equipment - The Scoop | Volvo CE. <https://volvoceblog.com/how-to-maintain-electric-heavy-equipment/>
- Lindgren, M. (2021). Behov av laddinfrastruktur för snabbbladdning av tunga fordon längs större vägar.
- Link, S., Stephan, A., Speth, D., & Plötz, P. (2024). Rapidly declining costs of truck batteries and fuel cells enable large-scale road freight electrification. *Nature Energy* 2024 9:8, 9(8), 1032–1039. <https://doi.org/10.1038/s41560-024-01531-9>
- Mallick, S., & Gayen, D. (2023). Thermal behaviour and thermal runaway propagation in lithium-ion battery systems – A critical review. *Journal of Energy Storage*, 62, 106894. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106894>
- Mauler, L., Lou, X., Duffner, F., & Leker, J. (2022). Technological innovation vs. tightening raw material markets: falling battery costs put at risk †. / *Energy Adv*, 1, 136. <https://doi.org/10.1039/d1ya00052g>
- Mawdsley, I., & Helbig, T. (u. å). På uppdrag av Naturvårdsverket Kartläggning av eldrivna arbetsmaskiner. www.smed.se
- Myhrberg, E., & Ricknell, E. (2024). *Utveckling av totalkostnadsmodell för att utvärdera elektrifiering av tunga lastbilstransporter (1)* (tekn. rapport).
- Na, K., Biswas, S., Robertson, W., Sahay, K., Okamoto, R., Mitchell, A., & Lemieux, S. (2015). Impact of biodiesel and renewable diesel on emissions of regulated pollutants and greenhouse gases on a 2000 heavy duty diesel truck. *Atmospheric Environment*, 107, 307–314. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.02.054>
- Naturvårdsverket. (2024 oktober). Arbetsmaskiner, utsläpp av växthusgaser. <https://www.naturvardsverket.se/data-och-statistik/klimat/vaxthusgaser-utslapp-fran-arbetsmaskiner/>
- Naturvårdsverket. (2025 februari). *Förslag på åtgärder för att främja ladd- och tankinfrastruktur för arbetsmaskiner* (tekn. rapport). Naturvårdsverket. Stockholm.
- Nowtricity. (u. å). CO2 emissions per kWh in Sweden. <https://www.nowtricity.com/country/sweden/>
- Orangi, S., Manjong, N., Clos, D. P., Usai, L., Burheim, O. S., & Strømman, A. H. (2024). Historical and prospective lithium-ion battery cost trajectories from a bottom-up production modeling perspective. *Journal of Energy Storage*, 76, 109800. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2023.109800>

- Rahman, T., & Alharbi, T. (2024 juli). Exploring Lithium-Ion Battery Degradation: A Concise Review of Critical Factors, Impacts, Data-Driven Degradation Estimation Techniques, and Sustainable Directions for Energy Storage Systems. <https://doi.org/10.3390/batteries10070220>
- Roy, S., & Adhikari, G. R. (2007). *Worker noise exposures from diesel and electric surface coal mining machinery* (tekn. rapport).
- Skatteverket. (u. å). Skatt på el. <https://www.skatteverket.se/foretag/skatteochavdrag/punktskatter/energiskatter/skattpael.4.15532c7b1442f256bae5e4c.html>
- Skatteverket. (2025). Skattesatser, skattepliktig kvantitet m.m. – bränsle | Rättslig vägledning | Skatteverket. <https://www4.skatteverket.se/rattsligvagledning/edition/2025.1/323440.html>
- Stener, P., & Snabb, R. (2008). *Körbarhetskvantifiering av hjullastare Examensarbete Institutionen för ekonomisk och industriell utveckling* (tekn. rapport).
- Sturm, P., Föbbleitner, P., Fruhwirt, D., Galler, R., Wenighofer, R., Heindl, S. F., Krausbar, S., & Heger, O. (2022). Fire tests with lithium-ion battery electric vehicles in road tunnels. *Fire Safety Journal*, 134, 103695. <https://doi.org/10.1016/J.FIRESAF.2022.103695>
- SWECO. (2023). Vad kostar ett elektrifierat vägprojekt? <https://www.me.se/globalassets/medlemskap-media/om-oss/mes-elektrifieringsrapport-2023-10-31.pdf>
- Tahmasebi, S. (2018). *Ventilation and Cooling Comparison between Diesel and Electric Mining Equipment* (tekn. rapport).
- Taxell, P., & Santonen, T. (u. å). The Nordic Expert Group for Criteria Documentation of Health Risks from Chemicals and the Dutch Expert Committee on Occupational Safety. www.nordicexpertgroup.org.
- Taxell, P., & Santonen, T. (2016). The Nordic Expert Group for Criteria Documentation of Health Risks from Chemicals and the Dutch Expert Committee on Occupational Safety. www.nordicexpertgroup.org.
- Thrikawala, S., Batzlen, C., Korale-Gedara, P., Thrikawala, S., Batzlen, C., & Korale-Gedara, P. (2022). Cost-Benefit Analysis of Irrigation Projects 12. https://doi.org/10.1007/978-981-16-3284-6{_}12
- Trafikverket. (2023a). Klimat. <https://bransch.trafikverket.se/om-oss/var-verksamhet/sa-har-jobbar-vi-med/Miljo-och-halsa/Klimat/>
- Trafikverket. (2023b). Fossilfritt och framgångsrikt Framgångsfaktorer inför genomförandet av en helelektrifierad tunneldrivning Förstudie till Norrbotniabansans pilotprojekt.
- Trafikverket. (2024a). Vägledning till Gemensamma miljökrav för entreprenader 2024.
- Trafikverket. (2024b). Omvärldsanalys av arbetsmaskiner och fordon inom entreprenad.
- Trafikverket. (2024c). Analysmetod och samhällsekonomiska kalkylvärden för transportsektorn.
- Transportstyrelsen. (2024). Avgaser. <https://www.transportstyrelsen.se/sv/vagtrafik/Miljo/Luftkvaliet-i-tatorter/Avgaser/>
- UN Global Compact Network Sweden. (2024). Guide Forward Faster med internpris på koldioxid.

- Wang, H. (2025). Battery Types – Lithium Batteries – Lithium Battery Safety | Fire Risks and Fire Extinguishing. *Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering*, 760–766. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-96022-9.00282-6>
- Wang, Q., Mao, B., Stoliarov, S. I., & Sun, J. (2019). A review of lithium ion battery failure mechanisms and fire prevention strategies. *Progress in Energy and Combustion Science*, 73, 95–131. <https://doi.org/10.1016/J.PECS.2019.03.002>
- WHO. (2018). Noise Guidelines for the European Region. <http://www.euro.who.int/pubrequest>
- Volvo Lastvagnar. (u. å). Volvo FH - ikonerna inom fjärrtransport. <https://www.volvotrucks.se/sv-se/trucks/models/volvo-fh.html>
- WSP. (2021 september). *Transport- och Trafik-utredning Cementa Slite* (tekn. rapport). <https://www.cement.heidelbergmaterials.se/sites/default/files/2022-04/Bilaga%20B3.%20Transport-%20och%20trafikutredning.pdf>
- Yang, X., Liu, Y., Liu, K., Wei, J., Hu, G., & Pei, S. (2024). Application and configuration analysis of electric muck transfer equipment in plateau railway tunnel: a case study in southwest China. *Scientific Reports*, 14(1), 7222. <https://doi.org/10.1038/S41598-024-57628-4>
- Zeppelin. (u. å). 988K XE - 2022 Aus-NZ, Eur, Japan, N Am, S Am | Zeppelin. https://zeppelin-cat.se/produkter/988k-xe-2022-aus-nz-eur-japan-n-am-s-am/?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=21150738674&utm_content=&utm_term=&gad_source=1&gclid=CjwKCAjwk43ABhBIEiwAvvMEBwHAd1ouYU-XfXXnD3wRAJspFah6N88vap3_YKiCAfWOIPe8R-rk-BoCXFAQAvD_BwE
- Zhao, L., Zhang, T., Li, W., Li, T., Zhang, L., Zhang, X., & Wang, Z. (2023 maj). Engineering of Sodium-Ion Batteries: Opportunities and Challenges. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.08.032>

A

Appendix A: Beräkning kostnader kostnadnyttoanalys

Värdena för nyttokostnadsanalysen har beräknats enligt följande för alla maskinerna:

Inköspris - Inköspriset har undersökts (2.2.1) och subventioner har antagits för de eldrivna maskinerna. För den eldrivna hjullastaren har ett inköspris uppskattats (3.2.1).

Laddinfrastruktur - De eldrivna fordonen har även en laddinfrastruktur som initialkostnad (2.2.1).

Ventilation - Kostnaden av ventilation för eldrivna arbetsmaskiner beräknas vara en tredjedel av de dieseldrivna (2.3.2 samt 2.2.1), och baseras på kostnad för ventilation i Västlänken (A. Johansson, personlig kommunikation, 26 februari 2025).

Drivkostnad - Drivkostnaden beräknas utifrån kostnad av drivmedlen (3.2.2) samt daglig användning (3.2.4), medräknat tomgång 30% för de dieseldrivna maskinerna.

Servicekostnad - Kostnaden för service är beräknad utifrån årlig användning av maskinen (2.2.2).

Värdering utsläpp - Ges av värden för emissioner (3.2.3).

Energiskatt - För de eldrivna fordonen tillkommer energiskatt utifrån användningen (2.4.2).

Eldriven hjullastare:										
År	0	1	2	3	4	5	6	7	8	Total
Inköpskostnad inkl. klimatpremie	9680764									
Laddinfrastruktur + extra batterier	1296000									
Drivskostnad	182232.8	188611	195212.3	202044.8	209116.3	216435.4	224010.7	231851		
Ventilation	276	285.66	295.7	306.0	316.7	327.8	339.3	351.1		
Servicekostnad	36110.53	37374.4	38682.5	40036.39	41437.66	42887.98	44389.06	45942.68		
Värdering utsläpp CO2	13503.83	13976.46	14465.64	14971.94	15495.95	16038.31	16599.65	17180.64		
Energiskatt	110345.1	114207.2	118204.4	122341.6	126623.6	131055.4	135642.3	140389.8		
Total:	10976764	342468.3	354454.7	366860.6	379700.7	392990.2	406744.9	420981	435715.3	14076680

Figur A.1: Tabell hjullastare eldriven

A. Appendix A: Beräkning kostnader kostnadnyttoanalys

Dieseldriven hjullastare:										
År	0	1	2	3	4	5	6	7	8	Total
Inköpskostnad	9000000									
Drivskostnad		1135778	1175530	1216674	1259257	1303331	1348948	1396161	1445027	
Ventilation		828	856.98	886.9743	918.0184	950.149	983.4043	1017.823	1053.447	
Servicekostnad		60435.72	62550.97	64740.25	67006.16	69351.38	71778.68	74290.93	76891.11	
Värdering utsläpp CO2		52563.47	54403.19	56307.31	58278.06	60317.79	62428.92	64613.93	66875.42	
Värdering utsläpp NOx + PM		54165.18	56060.96	58023.1	60053.91	62155.79	64331.25	66582.84	68913.24	
Total:	9000000	1303770	1349402	1396631	1445513	1496106	1548470	1602667	1658760	20801321

Figur A.2: Tabell hjullastare dieseldriven

Eldriven lastbil:										
År	0	1	2	3	4	5	6	7	8	Total
Inköpskostnad inkl. klimatpremie	3607500									
Laddinfrastruktur	1203000									
Drivskostnad		81940.95	84808.88	87777.19	90849.4	94029.12	97320.14	100726.3	104251.8	
Ventilation		276.0	285.7	295.7	306.0	316.7	327.8	339.3	351.1	
Servicekostnad		82593.0	85483.8	88475.7	91572.3	94777.4	98094.6	101527.9	105081.4	
Värdering CO2 utsläpp		6072.0	6284.5	6504.5	6732.1	6967.8	7211.6	7464.0	7725.3	
Energiskatt		49616.7	51353.2	53150.6	55010.9	56936.3	58929.0	60991.5	63126.2	
Total:	4810500	220498.6	228216.1	236203.6	244470.7	253027.2	261883.2	271049.1	280535.8	6806384

Figur A.3: Tabell lastbil eldriven

Dieseldriven lastbil:										
År	0	1	2	3	4	5	6	7	8	Total
Inköpskostnad	2200000									
Drivskostnad		470050.4	486502.2	503529.8	521153.3	539393.7	558272.5	577812	598035.4	
Ventilation		828	856.98	886.9743	918.0184	950.149	983.4043	1017.823	1053.447	
Servicekostnad		93771	97052.99	100449.8	103965.6	107604.4	111370.5	115268.5	119302.9	
Värdering CO2 utsläpp		20572.6	21292.6	22037.9	22809.2	23607.5	24433.8	25289.0	26174.1	
Värdering NOx + PM		61520.95	63674.18	65902.78	68209.38	70596.7	73067.59	75624.95	78271.83	
Total:	2200000	646743	669379	692807.2	717055.5	742152.4	768127.8	795012.2	822837.7	8054115

Figur A.4: Tabell lastbil dieseldriven

B

Appendix B: Tematisk sammanställning av intervjuer

1. Verksamhet och tunnelmiljö

De tre intervjuade aktörerna är GLC, Veidekke och Renta, vilka representerar olika faser och perspektiv i tunnelprojektens genomförande.

- R1 - Veidekke är en entreprenör med erfarenhet av både gruvdrift och tunnelbyggnation, bland annat inom projektet Västlänken. De arbetar aktivt med tunga maskiner i tunnlar och har insyn i utmaningarna under utlastningsfasen. Två representanter intervjuades samtidigt och behandlas som en gemensam respondent i analysen, då de framförde liknande perspektiv.
- R2 - Renta är en maskinuthyrare som har lång erfarenhet av att leverera utrustning till tunnelprojekt, de senaste stora projektet var byggandet av Varbergstunneln. Deras maskiner var i bruk under hela projektets gång, vilket ger dem god insyn i hur utrustningen påverkas av den krävande tunnelmiljön.
- R3 - GLC är en ekonomisk förening som samordnar cirka 80 fristående åkerier, med fokus på materialtransporter till och från arbetsplatser. De har begränsad erfarenhet av arbete inne i tunnelmiljöer men har erfarenhet av transport av schaktmassor.

Gemensamt för samtliga är att de beskriver tunnelmiljöer som utmanande, särskilt med avseende på trånga utrymmen, komplicerad logistik och hög belastning på arbetsmaskiner. De beskriver även den noggranna planering som krävs vid tunnelarbeten, både för att säkerställa ett produktivt arbete och för att upprätthålla säkerheten.

2. Maskinanvändning och teknik

Alla aktörer bekräftar att dieseldrivna maskiner fortfarande är de mest använda inom tunnelarbete idag. R3 har bara ett fåtal eldrivna lastbilar, uppskattningsvis 2 till 3 av totalt cirka 120 fordon. Dessa lastbilar används främst inom distributionsverksamhet där rutterna är förutsägbara och laddinfrastrukturen finns lättillgänglig vid samma platser varje dag. Inom anläggningsprojekt används i huvudsak dieseldrivna fordon.

R1 använder framför allt dieseldrivna hjullastare och grävmaskiner i sina tunnelprojekt. Vissa maskiner, såsom borrhjullastare och sprutrobotar, drivs dock med kabelanslutet el. Batteridrivna maskiner är ovanliga i utlastningsfasen. Tunnelmiljön karaktäriseras som smal, men den rymmer ändå två maskiner som kan arbeta sida vid sida. Behovet av det anses dock vara begränsat och istället föredras större maskiner med hög kapacitet. Samtliga maskiner i Västlänken hyrs.

R2 har genomfört tester av eldrivna bomliftar, vilka vanligtvis försörjs med HVO100. De hävdar att batteridrift i praktiken påverkas av stora laddningsbehov och bristande uthållighet vilket gör teknologin mindre användbar. Det är dessutom förbjudet att lämna batteridrivna maskiner i tunnlar över natten, eftersom det innebär brandrisker vid laddning. Detta gör det än svårare att införa elektriska arbetsfordon i tunnelmiljöer.

3. Tekniska och praktiska hinder

Batterikapaciteten är för liten och det saknas laddinfrastruktur påstår alla respondenter.

R3 beskriver hur till exempel eldrivna fordon är tvungna att laddas mitt under arbetsdagen vilket gjorde arbetet mindre effektivt. De nya modellerna klarar visserligen ett helt arbetspass, vilket man ser som en central förutsättning för att man ska kunna börja använda eldrivna lastbilar. Tillgång till tillgänglig laddinfrastruktur under arbetspasset ses som en utmaning.

R1 menar man att projekten är korta, ungefär 1–3 år, vilket gör det svårt att motivera att installera i fast laddinfrastruktur. De jämför med gruvdrift, där man har kommit längre i omställningen till eldrift, och påstår att detta beror på att man där kan göra långsiktiga investeringar. El blir främst intressant till stationära moment, där man kan ha kabeldrift, medan diesel är det mer praktiska alternativet gällande mobila maskiner idag. Risken för termisk rusning, vid bränder i batterier i tunnlar och berg, är en allvarlig säkerhetsrisk och behöver utredas vidare.

R2 lyfter problemet med att eldrivna maskiner inte får stå kvar i tunneln nattetid, utan måste köras ut och laddas utanför på grund av brandrisken. Detta beskrivs som ett moment som inte är hållbart i längden.

4. Ekonomiska aspekter

Ekonomi är en återkommande fråga. Respondenterna pekar på att investeringskostnaden för elmaskiner är betydligt högre än för motsvarande dieselfordon.

R1 menar att investeringar kräver kännedom om marknaden och att man tar hänsyn till eventuella prisförändringar för att vara säker på att investeringen kan betala sig. Samtidigt är bränslekostnaden en stor utgiftspost och en kostnad som går att spara

in vid en omställning vilket de ser som positivt. Samtidigt understryker de att det i slutändan är priset som är avgörande för om de väljer att ha det elektrifierade alternativet, även om det skulle medföra många andra positiva saker som inte ekonomiskt speglar sig i priset.

R3 nämner också att en eldriven lastbil kan kosta 5,5–6 miljoner kronor, medan en diesel istället sträcker sig upp till cirka 3,5 miljoner kronor. För att fordonet ska kunna användas effektivt krävs daglig toppladdning, något som ofta är dyrare på dagtid. Skillnaden i pris mellan normalladdning och snabbladdning är stor och även investering i laddningsinfrastruktur måste räknas in i de ekonomiska jämförelserna med dieselfordon. R3 framhåller även att långa kontrakt är avgörande för att våga investera i eldrift. Korta projekt gör det svårare att räkna hem investeringen.

R2 bekräftar att högre inköspriser påverkar hyrespriser, något som kan innebära att efterfrågan från deras kunder minskar. De noterar samtidigt att elmaskiner oftast har lägre driftskostnader, både vad gäller bränslekostnaden och servicen. Servicen uppskattas vara omkring 30% lägre än för motsvarande dieselfordon.

R1 uppger vidare att ventilationskostnader ofta är beställarens ansvar och i fallet med Västlänken så är beställaren Trafikverket. Detta innebär att vinsten med minskade utsläpp inte alltid blir en drivkraft för entreprenören sett ur ett perspektiv av möjliga besparingar.

5. Arbetsmiljö och säkerhet

R2 och R3 pekar på förbättrad arbetsmiljö med eldrift, främst genom minskat utsläpp av avgaser, minskat buller samt mindre vibrationer. Detta möjliggör arbete under känsliga tider, exempelvis under natten. De påpekar även att deras medarbetares välmående är en prioriterad fråga. R1 menar dock att arbetsmiljövinster vid arbetet med elmaskiner i tunnel är små, då bullernivån redan är mycket hög.

R1 och R2 uttrycker oro angående säkerhetsaspekter, inte minst risken för brand till följd av termisk rusning. R2 framhåller att elmaskiner inte får stå kvar i tunneln nattetid och ladda, samt att det kan ställas krav på dom när det gäller anpassning av maskiner för tunneldrift. De nämner ett fall där det ställdes krav på att utrusta elmaskinen med ett sprinklersystem i motorrummet samt tre brandsläckare för att den skulle vara godkänd för användning i tunnlar. R1 uppger att de för närvarande inte kör med batteridrivna fordon i tunnlar överhuvudtaget på grund av risken för batteriskada och brand. De efterfrågar ytterligare studier inom frågan.

R1 nämner att kommande skärpta arbetsmiljööregler kan kräva ökad ventilation vilket i sin tur kan påverka kringliggande bostäder av ökat buller men även innebära ett ökat elbehov. De beskriver även tidigare incidenter då ventilationen brustit, vilket lett till mycket dåliga arbetsförhållanden för de som arbetade i tunneln.

6. Fördelar jämfört med diesel

respondenterna pekar på att eldrivna maskiner erbjuder flera fördelar:

- Minskade utsläpp och förbättrad luftkvalitet
- Mindre buller och vibrationer
- Möjlighet till arbete under mer störningskänsliga tider, i detta fall natt.
- Lägre driftskostnader, både i form av bränsle och service

R3 ger ett exempel att eldrivna kranbilar möjliggjort nattarbete i stadsmiljö utan att störa omgivningen. R2 påpekar att dieseldrivna maskiner är dyrare att serva, då fler komponenter behöver bytas ut.

R1 menar att fördelarna vägs upp av praktiska hinder, särskilt i den mycket svåra tunnelmiljön där buller och dålig luft på grund av sprängasär ändå är mycket påtagliga.

7. Nackdelar jämfört med diesel

Respondenterna pekar särskilt ut följande nackdelar med eldrift i nuläget:

- Otillräcklig räckvidd och drifttid
- Logistikproblem relaterade till laddning och transport av maskiner
- Höga investeringskostnader och osäker andrahandsmarknad
- Brandsäkerhetsrisker vid batteridrift i slutna utrymmen

8. Framtidsutsikter och incitament

Trots utmaningarna uttrycker samtliga aktörer en positiv syn på framtiden för elektrifiering, förutsatt att tekniken och förutsättningarna på marknaden förbättras.

- R1 ser inte eldrift som ett realistiskt alternativ i dagsläget, ett citat lyder "För att vara helt ärlig så har det inte alls varit uppe som ett alternativ."
- R2 investerar redan i eldrivna maskiner och upplever en hög efterfrågan från sina kunder.
- R3 vill investera mer, men efterfrågar tydliga krav och längre kontrakt.

R1 menar att deras maskinval i stor utsträckning påverkas av vad uthyrare erbjuder. De krav de ställer på sina underentreprenörer är den kravställning som Trafikverket ställt upp, alltså har företaget själva inga interna kravspecifikationer. R3 betonar att de samarbetar med kund, leverantör och tillverkare för att möjliggöra att fler investeringar i eldrift görs, trots de högre kostnaderna. R2 framhåller att både minskade klimatutsläpp och förbättrad arbetsmiljö är starka drivkrafter bakom omställningen.

Trafikverket identifieras som en viktig aktör för att driva på utvecklingen genom att ställa krav i upphandlingar. R1 ser att en rimlig utveckling av kraven är att man i framtiden endast får använda nollutsläppsfordon.

9. Slutsats

Det finns en gemensam förståelse för att elektrifiering innebär tydliga miljö- och arbetsmiljöfördelar, men de praktiska och ekonomiska hindren är betydande i nuläget samtidigt som branschen ibland beskrivs som svårförändrad. För att möjliggöra en bredare övergång till eldrift krävs:

- Bättre anpassade maskiner
- En kostnadsbild över hela livscykeln som kan jämföras med dagens alternativ
- Laddinfrastruktur som fungerar i tunnelmiljö
- Tydligare krav från beställare
- Samverkan mellan entreprenörer, leverantörer och myndigheter

INSTITUTIONEN FÖR MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2025



CHALMERS