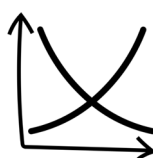




EUROPEISKA
UNIONEN
Europeiska
regionala
utvecklingsfonden



Interaktionseffekter mellan batterielektriska lastbilar, elvägar och statisk laddinfrastruktur

Resultat från högupplöst simulering av godstransporter på det svenska vägnätet under perioden 2020–2050

Jakob Rogstadius

RISE Rapport 2022:110, version 2022-11-24

Interaktionseffekter mellan batterielektriska lastbilar, elvägar och statisk laddinfrastruktur

Jakob Rogstadius

Key words: Electric Road Systems (ERS), charging infrastructure, battery-electric trucks, interaction effects, complex systems, simulation

RISE Research Institutes of Sweden AB

RISE Rapport 2022:110, version 2022-11-24

ISBN: 978-91-89711-61-7

Stockholm 2022

Abstract

Interaction Effects between Battery Electric Trucks, Electric Road Systems and Static Charging Infrastructure

The author can provide translations of this report into other languages on request.

What was studied?

This report explores complex interaction effects between diesel-powered and battery-powered heavy trucks, dynamic vehicle charging via electric roads, and static charging via other forms of charging infrastructure. The aim is to identify how these components of the future transport system should be jointly designed to simultaneously minimize the cost to society at the system level and meet society's need for greatly reduced greenhouse gas emissions from heavy road traffic. Focus is on investigating how an expansion of electric roads would affect the system and whether a national investment in electric roads can be assumed to have positive consequences that cannot be achieved at a lower cost using other means. Interaction effects are studied over time (2020–2050), geography (the entire Swedish road network), for four different truck weight classes and four types of charging infrastructure (electric roads, depot charging, destination charging and fast charging at rest stops).

What method was used?

The results are based on analyzes of hundreds of scenarios for the future expansion of charging infrastructure in Sweden. These scenarios have been analyzed using a custom-built simulation tool, which simulates freight transport along millions of routes on the Swedish road network. For each individual route, vehicle class and year, battery capacity and charging locations are optimized to ensure sufficient battery capacity and to minimize the business economic cost of freight transport along the route. The capacity and partially placement of charging infrastructure is demand-driven, based on the aggregate demand from all transport routes. User charges for charging are calculated individually for different charging infrastructure sites based on estimated usage, in competition with other charging infrastructure, and are fed back to influence the choice of charging method along transport routes. Driving patterns, used combinations of charging infrastructure, capacity of battery packs in vehicles and changing battery technology over time are used to dynamically calculate the life cycle cost of vehicle batteries. Today's tax revenue from fuel sales is converted into a kilometer tax that is applied equally to both diesel and battery electric vehicles.

What do the results show?

Today, the electrification of truck traffic in Sweden is prevented by almost non-existent access to public charging infrastructure (fast charging at rest stops, at destination and/or charging from electric roads). When truck traffic cannot rely on charging at locations other than the own depot, trucks must be equipped with very large battery packs to have sufficient range to reach the destination. This has the consequence that the transport economy is worse for battery-electric than for diesel-powered trucks.

However, both today's battery technology and charging infrastructure technology are sufficient to design combinations of charging infrastructure and battery-electric trucks that together provide lower transport costs than today's diesel operation, with maintained tax revenues and without subsidies. If dense charging infrastructure, including electric roads, were already in place, approximately 80% of traffic work with heavy trucks would be possible and profitable to electrify already today. In the long term, electrification can contribute up to a 40% reduction of the cost of freight transport by heavy trucks, compared to today's costs.

A comparison with other proposed methods for emission reduction indicates that a rapid conversion to battery-electric trucks is necessary to reach Sweden's and the EU's already adopted targets for emission reductions for road traffic. Even if other methods are applied, such as blending biofuels into the fossil fuel and transfer of goods to rail, the fact that road traffic needs to be electrified immediately does not change. The study also shows that turbulence in the energy market increases the cost advantages of electric operation relative to diesel.

The study shows that a future transport system designed to minimize the cost of freight transport with heavy trucks is fully electrified and includes all forms of analyzed charging infrastructure. However, no single type of charging infrastructure must be included for far-reaching electrification of heavy truck traffic, and which route the energy takes to the electric vehicles has a significantly smaller impact on the system's total cost than the transition from diesel to battery-electric operation.

Although no single type of charging infrastructure is strictly necessary, depot charging and charging via electric road show major competitive advantages versus fast charging stations located at rest stops and destinations. If public fast charging stations at rest areas are built before electric roads, there is a substantial risk that the facilities will be over-dimensioned with significantly greater capacity than what is demanded in later years when electric road infrastructure is built nearby. The consequence of oversizing is high user costs and subsequently a very low utilization rate. If roads are electrified, fast charging stations should only have a total site power output of approx. 1 MW, compared to over 10 MW for some sites without electric roads. Early during the transition when most traffic still runs on diesel, electric roads and depot charging are the most cost-effective methods to create the conditions for large-scale electrification, while public fast charging stations are the most cost-effective charging infrastructure to add to the system when a large share of truck traffic is already electrified.

Access to an electric road along a route means that the battery capacity of vehicles using the route can be significantly reduced, on average approx. 70% per truck. The magnitude of the reduction depends on the length of the route, the weight class of the vehicle and how much of the route overlaps with the electric road. The reduced need for battery capacity results in lower depreciation costs for vehicles, lower capital costs and lower vehicle weight. This in turn results in cost advantages for electric road-adapted vehicles in relation to other battery electric vehicles that are on par with today's profit margins in the trucking industry. Along stretches where electric roads are built, it is estimated that 60–100% of the heavy traffic will use the infrastructure.

Expansion of electric roads is the only method identified capable of reducing the overall rate of consumption of vehicle batteries. Continuous electric road (without gaps) on approx. 4,000 km of the Swedish road network leads to a halving of the entire national

battery consumption for the vehicle classes that use the electric road, compared to electrification without an electric road.

Analysis of over 500 future scenarios shows that decisions can safely be made regarding national investment in electric road infrastructure without knowledge of the future availability of other charging infrastructure. Regardless of how other charging infrastructure develops, the most cost-saving option from a system perspective is to develop electric roads on up to approx. 4,000 km of the Swedish road network, with an average power including gaps of at least 150 kW per truck. Total power output from the electric road is affected by access to other charging infrastructure, but not substantially. Not building an electric road at all is always the option with the highest system cost.

If only heavy trucks are considered, electric road with conductive rail or overhead line is recommended. In combination with prior research, however, the results point to that passenger cars should also be included as users of electric road infrastructure, which would exclude an electric road with only overhead lines. The study cannot provide an answer as to whether inductive electric road technology would be the best alternative if all road traffic is counted as potential users.

Due to the electric road's very strong competitiveness in both the short and long term, it is of great importance for private investors in both other charging infrastructure and battery electric vehicles that the public sector makes clear and long-term decisions about the future availability of electric road infrastructure. It is not possible to estimate the demand for public stationary charging or to correctly size vehicle batteries without assumptions of the future access to electric roads. By postponing decisions on electric roads, the public sector directly contributes to a reduced rate of electrification of heavy road transport, as uncertainty increases the financial risk for private investments in both charging infrastructure and vehicles.

What recommendations follow from the results?

Sweden's short-term goal of a 70% reduction in fossil greenhouse gas emissions from road traffic by 2030 requires a large-scale, dense, and rapid expansion of charging infrastructure, but this charging infrastructure does not need to include electric roads. It appears unlikely that Sweden's long-term goal of zero emissions of fossil greenhouse gases from road traffic by 2045 can be achieved without the large-scale establishment of electric roads. Electric roads constitute a long-term competitive form of charging infrastructure, and the societal value of the electric road infrastructure is greater the earlier the electric road is built out. Regardless of what the decision is, a long-term reliable political decision should be made on whether electric roads will be established, and if so, when and along which routes, in order to reduce the business-economic risk for private investors in both other charging infrastructure and battery electric vehicles.

The results of the study indicate that approx. 4,000 km of the Swedish road network should be electrified. If a future battery shortage is assumed, the electric road should be continuous (without gaps) and able to be used by both heavy and light traffic. Major roads inside larger cities should early on be included as part of the electrified road network, even if the selected technology only supports heavy trucks. The expansion of a Swedish electric road for heavy trucks should be coordinated and connected with corresponding infrastructure investments in neighboring countries, since a large proportion of the heavy traffic on the Swedish road network is international.

Sammanfattning

Vad har studerats?

I denna rapport utforskas komplexa interaktionseffekter mellan dieseldrivna och batteridrivna tunga lastbilar, dynamisk fordonsladdning via elvägar, samt statisk laddning via andra former av laddinfrastruktur. Syftet är att identifiera hur dessa komponenter i det framtida transportsystemet gemensamt bör utformas för att samtidigt minimera samhällskostnaden på systemnivå och möta samhällets behov av kraftigt minskade utsläpp av växthusgaser från den tunga vägtrafiken. Särskilt fokus ligger på att utreda hur en utbyggnad av elvägar skulle påverka systemet och om en nationell investering i elvägar kan antas få positiva konsekvenser som inte kan uppnås till lägre kostnad på andra sätt. Interaktionseffekter studeras över tid (år 2020–2050), geografi (hela det svenska vägnätet), för fyra olika lastbilsviktklasser och fyra typer av laddinfrastruktur (elvägar, depåladdning, destinationsladdning och snabbbladdning vid rastplatser).

Vilken metod har använts?

Resultaten är baserade på analyser av hundratals scenarier för den framtida utbyggnaden av laddinfrastruktur. Dessa scenarier har analyserats med hjälp av ett egenutvecklat simuleringsverktyg, som simulerar godstransporter längs miljontals rutter på det svenska vägnätet. För varje individuell rutt, fordonsklass och år optimeras batterikapacitet och platser att ladda för att garantera att tillräcklig batterikapacitet används och för att minimera den företagsekonomiska transportkostnaden för godstransporter längs ruten. Dimensioneringen och delvis placeringen av laddinfrastruktur är efterfrågestyrd, baserad på den sammanlagda efterfrågan från alla transportrutter. Brukarkostnader för laddning beräknas individuellt för olika laddinfrastrukturplaneringar baserat på beräknat nyttjande, i konkurrens med annan laddinfrastruktur, och återkopplas för att påverka valet av laddmetod längs transportruterna. Körmönster, nyttjade kombinationer av laddinfrastruktur, kapacitet på batteripack i fordon och föränderlig batteriteknik över tid används för att dynamiskt beräkna livscykelkostnaden för fordonsbatterier. Dagens skatteintäkter från bränsleförsäljning räknas om till en kilometerskatt som tillämpas lika på både diesel- och batterielektriska fordon.

Vad visar resultaten?

Idag förhindras elektrifiering av lastbilstrafiken i Sverige av närmast obefintlig tillgång till publik laddinfrastruktur (snabbbladdning vid rastplatser, vid destination och/eller laddning från elväg). När lastbilstrafiken inte kan förlita sig på laddning på andra platser än den egna depån behöver lastbilar utrustas med mycket stora batteripack för att transporterna alls ska gå att genomföra. Detta får konsekvensen att transportekonomin blir sämre för batterielektriska än för dieseldrivna lastbilar.

Både dagens batteriteknik och laddinfrastrukturteknik är dock tillräckliga för att det ska vara möjligt att utforma kombinationer av laddinfrastruktur och batterielektriska lastbilar som tillsammans ger lägre transportkostnader än dagens dieseldrift, med bibehållna skatteintäkter och utan subventioner. Om tät laddinfrastruktur inklusive elväg redan var utbyggd skulle ca 80 % av trafikarbetet med tunga lastbilar vara möjligt

och lönsamt att elektrifiera redan idag. På sikt kan elektrifiering bidra med en kostnadsminskning på upp till 40 % för godstransporter med tunga lastbilar, jämfört med dagens kostnader.

En jämförelse med andra föreslagna metoder för utsläppsreduktion pekar på att en snabb omställning till batterielektriska lastbilar är nödvändig för att nå Sveriges och EU:s redan antagna mål om utsläppsminskningar. Även om andra metoder tillämpas, som inblandning av biodrivmedel i det fossila bränslet och överflyttning till järnväg, ändras inte det faktum att vägtrafiken behöver elektrifieras omgående. Studien visar också att turbulens på energimarknaden ökar kostnadsfördelarna med eldrift relativt diesel.

Studien visar att ett framtida transportsystem utformat för att minimera kostnaden för godstransporter med tunga lastbilar är fullt elektrifierat och innehåller alla former av analyserad laddinfrastruktur. Ingen enskild typ av laddinfrastruktur är dock nödvändig för långtgående elektrifiering av de tunga vägtransporterna och vilken väg energin tar till elfordonen har en betydligt mindre påverkan på systemets totalkostnad än övergången från diesel till batterielektrisk drift.

Även om ingen enskild typ av laddinfrastruktur är absolut nödvändig uppvisar depåladdning och laddning via elväg stora konkurrensfördelar jämfört med snabbbladdarstationer placerade vid rastplatser och destinationer. Om publika snabbbladdarstationer vid rastplatser byggs ut innan elvägar finns en stor risk att anläggningarna överdimensioneras med betydligt större kapacitet än vad som efterfrågas senare år när elvägsinfrastruktur byggs ut i närheten. Konsekvensen av överdimensionering är höga brukarkostnader och mycket låg nyttjandegrad. Om elvägar byggs ut bör snabbbladdarstationer endast ha en total anläggningseffekt på ca 1 MW, jämfört med över 10 MW för de största anläggningarna utan elvägar. I de tidiga faserna av omställning av systemet är elvägar och depåladdning de mest kostnadseffektiva metoderna att skapa förutsättningar för storskalig elektrifiering, medan publika snabbbladdarstationer den mest kostnadseffektiva laddinfrastrukturen att tillföra till systemet när en stor del av lastbilstrafiken redan är elektrifierad.

Tillgång till elväg längs en rutt medför att batterikapaciteten i fordon som trafikerar rutten kan reduceras avsevärt, i snitt ca 70 % per lastbil. Hur stor minskningen är beror av ruttens längd, fordonets viktclass och hur stor andel av rutten som överlappar med elvägen. Det minskade behovet av batterikapacitet medför lägre avskrivningskostnader för fordon, lägre kapitalkostnader och lägre fordonsvikt. Detta resulterar i sin tur i kostnadsfördelar för elvägsanpassade fordon i förhållande till andra batterielektriska fordon som är i paritet med dagens vinstmarginaler i åkeribranschen. Längs sträckor där elväg byggs beräknas 60–100 % av den tunga trafiken nyttja infrastrukturen.

Utbyggnad av elvägar är den enda identifierade metoden att minska den totala takten av konsumtion av fordonsbatterier. Kontinuerlig elväg på ca 4 000 km av det svenska vägnätet leder till en halvering av hela den nationella batterikonsumtionen för de fordonsklasser som nyttjar elvägen, jämfört med elektrifiering utan elväg.

Analys av över 500 framtidsscenarier visar att beslut om utbyggnad av elvägar tryggt kan fattas utan kännedom om den framtida tillgången på annan laddinfrastruktur. Oavsett hur annan laddinfrastruktur byggs ut är det mest kostnadsbesparande alternativet ur systemperspektiv att bygga ut elväg på upp till ca 4 000 km av det svenska vägnätet, med

en medeleffekt inklusive gap på minst 150 kW per fordon. Totalt effektuttag från elvägen påverkas av tillgången till annan laddinfrastruktur, men inte kraftigt. Att inte bygga någon elväg alls är alltid det alternativ som leder till högst systemkostnad.

För laddning av endast tunga lastbilar rekommenderas elväg med konduktiv skena eller luftledning. I kombination med tidigare forskning pekar resultaten dock på att även personbilar bör inkluderas som brukare av elvägsinfrastruktur, vilket skulle exkludera en elväg med endast luftledning. Studien kan inte ge svar på om induktiv elvägsteknik skulle vara det bästa alternativet om all vägtrafik räknas med som potentiella brukare.

På grund av elvägens mycket starka konkurrenskraft på både kort och lång sikt är det av mycket stor betydelse för privata investerare i både annan laddinfrastruktur och batterielektriska fordon att offentlig sektor tar tydliga och långsiktiga beslut kring elvägars vara eller icke vara. Det är inte möjligt att korrekt dimensionera investeringar i publik stationär laddning eller fordonsbatterier utan vetskap om den framtida tillgången till elvägar. Genom att skjuta på beslut om elvägar bidrar offentlig sektor direkt till minskad elektrifieringstakt av de tunga vägtransporterna, eftersom osäkerheten ökar den ekonomiska risken för privata investeringar i både laddinfrastruktur och fordon.

Vilka rekommendationer följer av resultaten?

Sveriges kortsiktiga mål om en minskning av växthusgasutsläppen från vägtrafiken med 70 % till 2030 kräver en storskalig, tät och snabb utbyggnad av laddinfrastruktur, men denna laddinfrastruktur behöver inte inkludera elvägar. Det framstår som osannolikt att Sveriges långsiktiga mål om nollutsläpp av växthusgaser från vägtrafiken till 2045 ska kunna uppnås utan storskalig etablering av elvägar. Elvägar utgör en långsiktigt konkurrenskraftig form av laddinfrastruktur och samhällsvärdet av elvägsinfrastrukturen är större ju tidigare elvägen byggs ut. Oavsett vad beslutet är bör ett långsiktigt tillförlitligt politiskt beslut tas om huruvida elvägar kommer att byggas ut och i så fall när och längs vilka sträckor, för att reducera den företagsekonomiska risken för privata investerare i både annan laddinfrastruktur och batterielektriska fordon.

Resultaten från studien pekar på att ca 4 000 km av det svenska vägnätet bör utrustas med elvägsinfrastruktur. Om fordonsbatterier antas bli en bristvara bör elvägen vara kontinuerlig (utan gap) och kunna nyttjas av både tung och lätt trafik. Större vägar inne i större städer bör tidigt ingå som en del av det vägnät där elvägar byggs ut, även om elvägen endast har stöd för tunga lastbilar. Utbyggnaden av en svensk elväg för tunga lastbilar bör koordineras och knyts samman med motsvarande infrastruktursatsningar i grannländerna, eftersom en stor andel av den tunga trafiken på det svenska vägnätet är internationell.

Innehåll

Abstract.....	1
Sammanfattning	4
Innehåll.....	7
1 Inledning	9
1.1 Bakgrund.....	10
1.1.1 Kunskapsläge	10
1.1.2 Typer av laddinfrastruktur.....	12
1.2 Syfte	13
1.3 Avgränsningar.....	14
2 Metod.....	15
2.1 Trafikdata.....	15
2.2 Utbyggnadsordning för statisk och dynamisk publik laddinfrastruktur.....	18
2.3 Simuleringsmodell.....	21
2.3.1 Begreppsdefinitioner	23
2.3.2 Ingående kostnadskällor	26
2.3.3 Modellerings av ett komplext system	29
2.4 Förenklingar och metodbegränsningar	30
3 Experiment	31
3.1 Samhällsekonomiskt värde av elektrifiering av tunga lastbilar	31
3.2 Robusthetsanalys av framtida batterikostnad.....	38
3.3 Effekter av att variera storleken på elvägnätet	40
3.4 Effekter av att variera elvägnätets elektrifieringsgrad och effekt.....	43
3.5 Avkastning på investeringar i laddinfrastruktur	45
3.6 Substitutionseffekter mellan elvägar och annan laddinfrastruktur	47
3.7 Interaktionseffekter mellan elvägar och fordonsbatterier	51
3.7.1 Elvägar minskar batterislitage och batterikapacitet per lastbil	51
3.7.2 Minskat batteribehov möjliggör lägre transportkostnad	55
3.8 Elvägars nyttjandegrad och geografiska spridningseffekter	58
4 Diskussion	61
4.1 Flaskhalsar i samhället påverkar vilken väg till elektrifiering som är bäst	61
4.2 Jämförelse med upplevda risker med elvägar	62
4.3 Jämförelse med andra åtgärder än elektrifiering för att minska växthusgasutsläppen från vägtransporter	67
4.4 Påverkan från höga elpriser.....	68
5 Slutsatser och rekommendationer	70
5.1 Allmänna slutsatser om elektrifiering av tunga lastbilar	70
5.2 Slutsatser om elvägar och annan laddinfrastruktur	72

6	Projektfinansiering	75
7	Källor	76
8	Bilaga A: Parameterantaganden	81
8.1	Batterier	81
8.2	Drivlinor	82
8.2.1	Prisskillnad, batterielektrisk lastbil jämfört med diesel, exklusive batteripack (EUR)	83
8.2.2	Viktskillnad, batterielektrisk lastbil jämfört med diesel, exklusive batteripack (kg)	83
8.2.3	Diesellastbil, prisskillnad mot år 2020	84
8.3	Fordon	84
8.3.1	MGV16	85
8.3.2	MGV24	86
8.3.3	HGV40	88
8.3.4	HGV60	89
8.4	Laddinfrastruktur	90
8.4.1	Laddinfrastrukturens nyttjandegrad	92
8.5	Övriga	95

1 Inledning

Sedan 1990 har växthusgasutsläppen från EU:s transportsektor ökat med 33 %, medan utsläppen från andra sektorer minskat med 32 % (Basma m.fl., 2022). Transportsektorn står idag för 29 % av utsläppen från hela EU och av transportsektorns utsläpp kommer 69 % från vägtrafiken, varav 17 % från tunga lastbilar. I Sverige står transportsektorn för en knapp tredjedel av landets växthusgasutsläpp (Sveriges Miljömål, 2022).

Sveriges Riskdag har beslutat att växthusgasutsläppen från inrikes transporter – utom inrikes luftfart som ingår i EU:s utsläppshandelssystem – ska minska med minst 70 % senast 2030 och 100 % senast 2045, jämfört med referensåret 2010 (Regeringskansliet, 2017). År 2019, året innan Covid19-pandemin, hade minskningen nått 20 %. För segmenten personbilar och tunga lastbilar hade minskningarna nått 15 respektive 34 % samma år (Naturvårdsverket, 2022). Minskningarna har hittills till största del uppnåtts genom inblandning av biodrivmedel i det fossila bränslet och genom effektivare förbränningsmotorer. År 2019 var andelen förnybart 5,1 % i bensin (en kraftig minskning från föregående år), 23,3 % i diesel och ca 85 % i E85 (Statens energimyndighet, 2020). Sveriges regering efter valet 2022 har aviserat att reduktionsplikten kommer att sänkas till EU:s lägstanivå (6 %) från 1 januari 2024 (Regeringskansliet, 2022), med motivering att kostnaderna för resor blivit för hög.

Samtidigt har Sverige närmast koldioxidneutral egen elproduktion (8 g CO₂e/kWh inhemsk produktion, ca 50 g CO₂e/kWh svensk elmix) och elektrifiering av vägtransporter har god potential att göra sektorn nästan helt fri från utsläpp av växthusgaser. I hela EU hade växthusgasutsläppen per producerad kWh el år 2020 minskat från 1990 års nivåer med 54 % och till 2030 förväntas en 80 procentig reduktion ha uppnåtts (110 g CO₂e/kWh) (European Environment Agency, 2022). Nivåerna kan jämföras med en förbränningsmotor driven med fossil diesel, som producerar motsvarande knappt 800 g CO₂e/kWh¹.

När transportindustrin nu står inför ett teknikskifte finns en unik möjlighet att ifrågasätta systemets utformning. Olika metoder att överföra elektrisk energi från energiproducenter till elmotorer i fordon har föreslagits, däribland stillastående laddning med kabel, laddning under rörelse från vägen och indirekt med vätgas som energibärare. Eftersom vissa tekniska egenskaper skiljer mellan batterielektriska elfordon och dagens fordon med förbränningsmotorer och nya komponenter blir kostnadsdrivande uppstår nya möjligheter att kapa kostnader i systemet. Det är dock ett mycket komplext system, där förändringar inom ett delsystem genom återkopplingseffekter skapar ändrade förutsättningar inom andra delsystem.

Ett exempel på komplexitet är att en höjning av laddeffekten vid en laddstation medför att batterikapaciteten i fordon behöver ökas för att batteriet ska kunna ta emot den högre effekten, vilket dels medför att fordonen blir mer kostsamma i inköp, dels att batterislitage från annan oförändrad laddinfrastruktur minskar och att batteriet i vissa fall håller längre. När laddeffekten ökas på en plats och mer energi kan överföras på samma tid medför det också att nyttjandet av annan laddinfrastruktur påverkas, eftersom den totala mängden energi varje enskilt fordon konsumerar per dygn förblir

¹ Baserat på antaganden om livscykelutsläpp motsvarande 3,23 kg CO₂e/liter och en omvandlingsfaktor från förbränningsmotor till elmotor på 4,2 kWh/liter.

konstant. När fordon med olika utförande och olika körmonster ska samexistera och dela på laddinfrastruktur, elpriser varierar med tid på dygnet och både kostnader och tekniska prestanda förväntas förändras kraftigt över tid växer snabbt komplexiteten. I ett längre perspektiv förväntas även en introduktion av självkörande fordon ha stor påverkan på driftmonster och transportekonomi.

I denna studie undersöks hur elektrifiering av stora delar av det svenska vägnätet med elvägsteknik skulle påverka bland annat annan laddinfrastruktur, dimensioneringen av batteripack i tunga lastbilar samt kostnaden för godstransporter med lastbil. Studiens vetenskapliga bidrag är främst att den bidrar med ny kunskap om hur återkopplingseffekter, geografiska interaktionseffekter och förändringar över tid interagerar i detta komplexa system.

1.1 Bakgrund

1.1.1 Kunskapsläge

Den internationella forskningen om elvägars samhällsekonomiska nytta och påverkan på transportsystemet är fortfarande begränsad. Installationer har endast genomförts i pilotskala och beräkningar av samhällsnyttan har därför utgått från olika antaganden om framtiden och olika mer eller mindre förenklade modeller av hur olika faktorer i transportsystemet interagerar (så även i denna studie). Intresse för elvägsteknik finns främst i Europa, pådrivet av teknikleverantörer i Tyskland, Sverige, Frankrike och Israel. Fokus i flera europeiska länder hamnade tidigt på Siemens lösning med kontaktledningar över vägen, vilket sannolikt bidragit till att diskussionen till stor del kommit att begränsas till elektrifiering av tunga lastbilar på motorväg. I USA diskuteras främst induktiv laddning av personbilar på större vägar i och utanför städer och i Sydkorea har fokus legat på induktiv laddning av kollektivtrafik.

Ur ett amerikanskt perspektiv och med utgångspunkt i dynamisk induktiv laddning lyfts kvalitativa fördelar med tekniken fram lyfts fram jämfört med statisk laddning (Tan m.fl., 2022), som förlängd fordonsräckvidd, reduktion av batterikapacitet och fordonsvikt och minskat behov av stilleståndstid, medan nackdelar är hög kostnad och låg teknisk mognad. Inga försök görs att kvantifiera om fördelarna är större än nackdelarna. Författarna summerar även elva föreslagna metoder för att placera ut elvägsinfrastruktur längs ett vägnät, där endast två av de många nämnda metoderna på något vis har tagit hänsyn till interaktionen mellan elvägar och annan laddinfrastruktur, och då endast publika snabbladdarstationer.

Baserat på ett urval av 44 rutter på det brittiska vägnätet beräknades att elvägsteknik med kontaktledning är en ekonomiskt fördelaktig metod att elektrifiera tung lastbilstrafik i Storbritannien jämfört med batterielektrisk drift utan elväg, att brukaravgifter kan betala av infrastrukturen på 15 år, samt att elvägen möjliggör drift med kraftigt minskad batterikapacitet (de Saxe m.fl., 2022). Även elvägar för lätt och tung trafik på det danska vägnätet har jämförts mot statisk laddinfrastruktur, med resultat att elvägar alltid ger en lägre kostnad än elektrifiering utan elvägar och på längre sikt även lägre än fossila drivmedel (Connolly, 2017). I (Börjesson m.fl., 2021) utvärderades samhällsnyttan av elvägar för tunga lastbilar i långdistanstrafik på det svenska vägnätet, där man fann att brukarkostnaden för elvägar kan sättas tillräckligt högt för att intäkterna ska täcka kostnaden av infrastrukturen, men att en lägre

brukarkostnad maximerar samhällsnyttan. Författarna spekulerade även att förbättrad batteriteknik och vätgasteknik kan minska elvägens långsiktiga konkurrenskraft. I en studie av laddinfrastruktur för personbilar i Stockholm beräknades att den statiska laddinfrastruktur som krävs för fullständig elektrifiering av personbilspopulation i regionen kostar minst lika mycket som den elväg som skulle krävas för att elektrifiera samma fordonspopulation, och att en sådan elväg även skulle kunna nyttjas av kommersiell trafik (Rogstadius, 2021).

I ett svenskt regeringsuppdrag (Natanaelsson m.fl., 2021) analyserades utbyggnad av 2000 km elväg till 2030 och ytterligare 1000 km till 2035 på det svenska vägnätet. Författarna fann att ca 25 % av den tunga trafiken längs de utbyggda sträckorna skulle nyttja infrastrukturen år 2040, samt att ökad inblandning av biodrivmedel skulle vara en betydligt mer kostnadseffektiv lösning för att reducera utsläppen i transportsektorn än utbyggnad av elvägar. För att underlätta jämförelser mellan resultaten från regeringsuppdraget och från denna studie görs här ett försök att förklara de metodmässiga skillnader som bidrar till att studierna når olika slutsatser.

I denna studie görs en dynamisk beräkning av hur stor andel av trafiken som nyttjar elvägar utifrån individuella beräkningar av längs vilka rutter elvägsladdning bidrar till minimering av de totala transportkostnaderna, i stället för att anta att endast den trafik som inte kan elektrifieras utan elvägar kommer att nyttja infrastrukturen. Bränsleförbrukningen för lastbilar med förbränningsmotor antas i denna studie minska med totalt 14 % mellan 2020 och 2050, främst till följd av aerodynamiska förbättringar som är oberoende av drivlina. I regeringsuppdraget antogs att bränsleförbrukningen för diesellastbilar kommer att halveras från dagens nivå till 2065, vilket ledde till betydande kostnadsminskningar över tid för dieseldrift. I denna studie antas att dieselpriiset inklusive skatter stiger från 1,47 €/liter 2020 till 2,9 €/liter 2050 (främst till följd av ökad biodrivmedelinblandning och ökad utsläppsbeskattning), vilket är högre än tidigare. I denna studie beräknas en total systemkostnad, inklusive fordon, laddinfrastruktur, bränslen, förarkostnader och utsläpp, för olika kombinationer av laddinfrastruktur. Elvägars marginalvärde rapporteras i förhållande till scenarier utan elvägar, med hänsyn tagen till både antagonistiska och synergistiska interaktionseffekter. I regeringsuppdraget bestämdes elvägars samhällsnytta till stor del av hur stor CO₂-reduktion som skapas utöver den reduktion som kan uppnås endast genom inblandning av biodrivmedel. Kostnaden för batterielektriska lastbilar antas på sikt vara lägre i denna studie på grund av att dessas i framtiden antas ha en längre livslängd än dagens lastbilar. Slutligen beräknas i denna studie fordonsbatteriers kapacitet och åldringstakt efter räckviddsbehov och nyttjad laddinfrastruktur längs individuella rutter, i stället för att beräkna batterikostnader oberoende av laddinfrastrukturens utformning.

Även elvägar på det franska vägnätet har undersökts, bland annat med slutsats att kostnaden för den nya infrastrukturen vida understiger de besparingar som uppstår genom minskat batteribehov (Perdu & Chaniot, 2021). Den optimala sträckningen ur systemkostnadsperspektiv på ett franskt elvägnät motsvarar enligt författarna nästan alla motorvägar och nationella vägar i landet, om elvägen är anpassad för den tunga trafikens behov. Om en teknik väljs som även är anpassad till lätta fordon växer den systemkostnadsminimerande sträckningen på det elektrifierade vägnätet ytterligare, med följd att även batterikapaciteten i lastbilar kan reduceras ytterligare. Med dessa elvägnät krävs 190 respektive 150 km batteriräckvidd i fordon som kör på det franska

vägnätet. Denna studie verkar dock inte ha tagit hänsyn till slitaget från laddning och urladdning ökar när batterier görs mindre och att batterikostnaden förväntas förändras kraftigt över infrastrukturens långa livstid.

Sammantaget verkar elvägar ha stor potential att sänka både kostnaderna och utsläppen av växthusgaser inom vägtrafiken. I förhållande till batterielektriska fordon som endast laddas stillastående kan sannolikt stora ekonomiska besparingar uppnås på kort sikt genom att minska batterikapaciteten i fordonen, och åtminstone på längre sikt bör transporter med batterielektriska fordon kunna bli billigare än transporter med fordon med förbränningsmotor. Trots antaganden hos vissa författare om att elvägar endast är attraktiva för tunga fjärrtransporter påvisar studier som analyserat lättare fordonsklasser även nyttor för personbilstransporter. Det är fortfarande oklart hur en blandning av olika former av laddning kan eller bör sättas samman för att uppfylla behoven i fordonspopulationen. Interaktionseffekter mellan elvägar och annan laddinfrastruktur verkar till stor del vara outforskade och ingen av de identifierade studierna har undersökt hur systemet med laddinfrastruktur, elvägar och fordon gradvis växer fram i konkurrens och hur marknaden kan tänkas anpassa utbudet över tid på grund av förändrade kostnader och tekniska förutsättningar. Studien som presenteras i denna rapport bidrar till att fylla detta kunskapsgap.

1.1.2 Typer av laddinfrastruktur

Denna studie berör infrastruktur för laddning av batterielektriska lastbilar – stillastående (statiska laddning) och i rörelse (dynamisk laddning). I detta avsnitt introduceras olika tekniker som finns på marknaden idag.

Ett elektriskt vägsystem (från Electric Road System, ERS), eller en elväg, möjliggör överföring av elektrisk kraft från en väg till ett fordon i rörelse för framdrivning och/eller laddning av batteri. ERS-teknologier mognar snabbt och utvärderas i flera länder vid testanläggningar och pilotinstallationer på allmänna vägar. Det finns ännu ingen storskalig elvägsinstallation i världen, men flera europeiska länder överväger tekniken, främst i syfte att minska växthusgasutsläppen från godstransporter med tunga lastbilar.

För närvarande finns det tre huvudkoncept för vägelektrifiering: luftburna kontaktledningar, ledande räls i vägbanan samt kontaktlösa induktiva lösningar. Samtliga tekniker har sina för- och nackdelar och utvecklas och marknadsförs av olika aktörer. En mer utförlig beskrivning av tekniken än den som tillhandahålls här finns i (Gustavsson m.fl., 2019).

En luftledningslösning använder kontaktledningar upphängda i stolpar över vägbanan för att tillhandahålla elektrisk energi ovanifrån fordonet, likt ett tåg. Energin överförs till fordonet med hjälp av en kraftmottagaranordning kallad strömavtagare eller pantograf installerad ovanpå fordonet. Tekniken marknadsförs främst av Siemens AG och stöder inte personbilar. Tung lastbilar och bussar kan laddas med en effekt på cirka 200–800 kW.

En rälslösning för energiöverföring från vägbanan använder ledande skenor installerade i eller på vägen. Energin överförs till fordonet via en strömavtagare installerad under fordonet, som sträcks ut och dras tillbaka automatiskt när fordonet passerar över infrastrukturen. Flera företag marknadsför lösningar, bland annat Alstom SA, Elonroad

AB, EVIAS AB och Honda Motor Company. Rälslösningar stödjer alla typer av fordon, med laddeffekt för lätta fordon runt 25–50 kW och tunga fordon runt 150–400 kW.

Kontaktlösa induktiva lösningar använder ett magnetfält för att överföra energin. Elektrisk ström i primärspolar installerade i vägbanan skapar magnetiska fält som inducerar ström i en sekundärspole installerad under fordonet. Leverantörer inkluderar OLEV, Bombardier, WAVE och Electreon. Laddeffekten per fordon är cirka 3,6–20 kW för personbilar och upp till 100 kW för tunga lastbilar. Induktiva gränssnitt kräver mindre underhåll och är bättre anpassade till vissa fysiska miljöer.

De komponenter som krävs i fordon för dynamisk laddning kan sannolikt eftermonteras, om gränssnitten skulle bli mer populära. Fabriksmontering vid fordonstillverkning har potential att minska kostnaderna jämfört med eftermontering.

Laddinfrastruktur för statisk laddning, eller statisk laddinfrastruktur, avser alla metoder för att leverera energi till ett fordon som kräver att fordonet förblir stillastående under energioverföringen. Den dominerande lösningen för fordonsladdning idag är statisk laddning via kabel, men marknaden fragmenteras av inkompatibla betalningslösningar, varumärkeslåsning och konkurrerande utformningar av kontakter. För tunga fordon har den kabelbaserade Megawatt Charging Standard introducerats och reglering påskyndar standardisering inom övriga områden.

Hårdvaran som kabeln är ansluten till finns i många former, inklusive stolpar som servar 1–4 intilliggande parkeringsplatser, pollare som kan sänkas ner i marken, långa horisontella stånglösningar som håller kablage över marken och som sträcker sig över flera parallella parkeringsplatser, uttag installerade direkt i marken, eller armar som sträcker sig från intilliggande väggar som kan nå över trottoarer. De olika lösningarna har alla olika för- och nackdelar som gör att de mer eller mindre lämpar sig för olika fysiska miljöer där laddning ska installeras. För tunga fordon krävs ofta höga laddeffekter över 150 kW, vilka hittills främst tillhandahållits genom stora skåp från vilka 1–4 tjocka kablar möjliggör laddning.

Även laddgränssnitt anpassade för dynamisk laddning kan även användas för statisk laddning, men dessa används ännu endast i pilotskala.

1.2 Syfte

Denna rapport utforskar komplexa systemeffekter som uppstår i interaktionen mellan batteridrivna tunga lastbilar, elvägar och andra former av laddinfrastruktur, i syfte att skapa bättre underlag för beslut om eventuell storskalig nationell utbyggnad av elvägsteknik på vägnätet i Sverige och i andra länder. Fokus ligger på att förstå orsakssamband, emergenta effekter, trender och att rangordna alternativ. Eftersom alla beräkningar utgår från antaganden om hur värden på ingående parametrar kommer att utvecklas och denna utveckling är förknippad med osäkerhet läggs mindre vikt på exakta kostnader i redovisningen av analysresultat.

Genom en serie experiment besvaras följande forskningsfrågor:

1. Hur värdeskapande är elektrifiering av tunga lastbilar ur ett samhällsekonomiskt perspektiv och hur förändras konkurrensläget mellan dieseldrivna och batterielektriska lastbilar över tid?

2. Kan utbyggnad av elväg vara värdeskapande ur ett samhällsekonomiskt perspektiv jämfört med elektrifiering utan elväg? Vilken längd, placering, utbyggnadstakt, effekt och täthet är i så fall mest värdeskapande?
3. Vilken typ av laddinfrastruktur är den mest kostnadseffektiva metoden att elektrifiera den tunga lastbilstrafiken?
4. Hur påverkar en elväg behovet av batterikapacitet i tunga elektriska lastbilar?
5. Hur förändras nyttan av en utbyggd elväg över dess tekniska livstid, på grund av exempelvis förbättrad batteriteknik?
6. Vilken andel av lastbilstrafiken på och utanför det elektrifierade vägnätet skulle nyttja en elväg?
7. Hur interagerar elväg och annan laddinfrastruktur placerad exempelvis vid lastbilsdepåer, godsterminaler och rastplatser? Vad är lämpliga kombinationer av dessa?
8. Hur förändras efterfrågan på olika typer av laddinfrastruktur under tiden fordonspopulationen elektrifieras och laddinfrastrukturen förtätas?

All text i figurer i rapporten är på engelska för att underlätta automatisk översättning av rapporten till andra språk än svenska.

1.3 Avgränsningar

Analyserna utförs utgående från tung trafik på det svenska vägnätet, med kostnadsantaganden i en svensk kontext. Det simuleringsverktyg som utvecklats går att tillämpa på andra länder, förutsatt att likvärdiga indata om transportflöden finns att tillgå och att antaganden anpassas till den nationella kontexten.

Lastbilstrafik delas upp i fyra viktclasser och där det bedöms relevant rapporteras resultat för de olika viktclasserna separat. De drivmedelsalternativ som analyseras är dieseldrift och batterielektrisk drift. I avsnitt 4.3 diskuteras andra föreslagna metoder än direkt elektrifiering för att eliminera utsläppen av växthusgasutsläpp från vägtransporter. Mängden trafik hålls konstant genom hela den studerade tidsperioden för att reducera komplexiteten i tolkningen av analysresultaten, men simuleringsmodellen kan användas för att beräkna resultat med andra prognoser för mängden trafik på vägarna. Även inflation och omräkningar till nettonuvärden undviks för att reducera komplexiteten.

Infrastruktur för laddning av elektriska fordon kan i modellen placeras vid lastbilsdepå, destination (till exempel lastkaj), naturliga rastplatser och längs vägbanan. Studien avser ingen specifik elvägsteknik utan använder en kostnadsmodell med parameterantaganden som approximerar kostnadsuppgifter från flera tillverkare. Studien fokuserar på tidsperioden 2020–2050, med en tidsupplösning på femårsintervall. På grund av kvalitetsbegränsningar i ingående trafikdata görs få uttalanden om vägnäten inne i städer, trots att sådan analys är möjlig med hjälp av det utvecklade simuleringsverktyget.

Vissa viktiga frågor lämnas obesvarade, däribland en känslighetsanalys med avseende på de många parameterantaganden som gjorts, samt hur inkludering av personbilstrafik i analyserna skulle påverka resultaten. Vår avsikt är att besvara dessa i en framtida rapport.

Scenarier med autonoma fordon undersöks inte i denna rapport, men förarlöner redovisas som en separat kostnadspost i beräkningarna. Förarlösa fordon kan antas medföra långtgående förändringar av transportbranschen, bland annat genom minskade driftkostnader, borttaget krav på regelbundna raster under körning och större ekonomiska fördelar med 24-timmarsdrift (högre kapitalkostnader och lägre driftkostnader). Dessa förändrade förutsättningar bör minska nyttan av laddinfrastruktur vid rastplatser och depåer, och öka nyttan av laddinfrastruktur vid destinationer och längs vägbanan.

2 Metod

De ställda forskningsfrågorna besvaras genom att olika scenarier utforskas och jämförs med varandra, med hjälp av ett egenutvecklat simuleringsverktyg. Scenarier beskriver hur, var och när laddinfrastruktur kan etableras och verktyget beräknar vilken drivlina, batterikapacitet och laddstrategi som ger lägst driftkostnad längs varje av ett stort antal transportrutters längs det svenska vägnätet. Genom att summera information från de individuella rutterna fås statistik om totalt nyttjande av laddinfrastruktur på olika platser, grad av transportelektrifiering på vägarna, totala CO₂-utsläpp och andra värden av intresse. Valet att låta elektrifiering vara en konsekvens av laddinfrastruktur (och inte omvänt) stöds av den stora potential för företagsekonomiska besparingar som elektrifiering medför (se avsnitt 3.1), men som inte kan realiseras om tillräckligt tät laddinfrastruktur först kommer på plats.

2.1 Trafikdata

Detta är en sammanfattning metoden som använts för framtagandet av de trafikdata som används i studien. För en fullständig beskrivning hänvisas till (Alfredsson & Rogstadius, 2022). För att få tillgång till datasetet, vänligen kontakta författaren.

En förutsättning för denna typ av analys är tillgång till data om hur trafiken på vägnätet går. I brist på verklig uppmätt data har vi utgått från Samgods (Trafikverket, 2017) basscenario för år 2017. Samgodsmodellen utgår från information om produktion, konsumtion och flöden av varor inom och mellan olika platser och regioner och fördelar dessa varuflöden mellan olika trafikslag, däribland olika lastbils-kategorier. Från basscenarioet hämtar vi en så kallad OD-matris (origin-destination) som beskriver hur många transporter och hur många ton gods som fraktas med varje fordonsklass mellan olika platser under ett år. Den geografiska upplösningen är Sveriges 290 kommuner, ett antal större transportnoder (såsom hamnar och godsterminaler) och ett antal större utländska regioner. Totalt innehåller datasetet ca 200 000 godsflöden, vardera uppdelat i årligt tonnage för varje av upp till fem fordonsviktklasser. Vi har använt data för viktklasserna MGV16, MGV24, HGV40 och HGV60. LGV3 som ingår i datasetet har vi valt att inte använda på grund av, enligt vår bedömning, bristande datakvalitet.

MGV16 är en tung lastbil utan släp, totalvikt 3,5–16 ton, som vanligtvis används i lokaldistribution. Bil med 2 axlar. MGV24 är en tung lastbil utan släp, totalvikt 16–24 ton, som vanligtvis används för anläggningsarbete. Bil med 3 axlar. HGV40 är en tung lastbil med släp, totalvikt 25–40 ton som vanligtvis används för fjärrtransporter. Bil med 3 axlar och släp med 4 axlar. HGV60 är en tung lastbil med släp, totalvikt 25–60 ton,

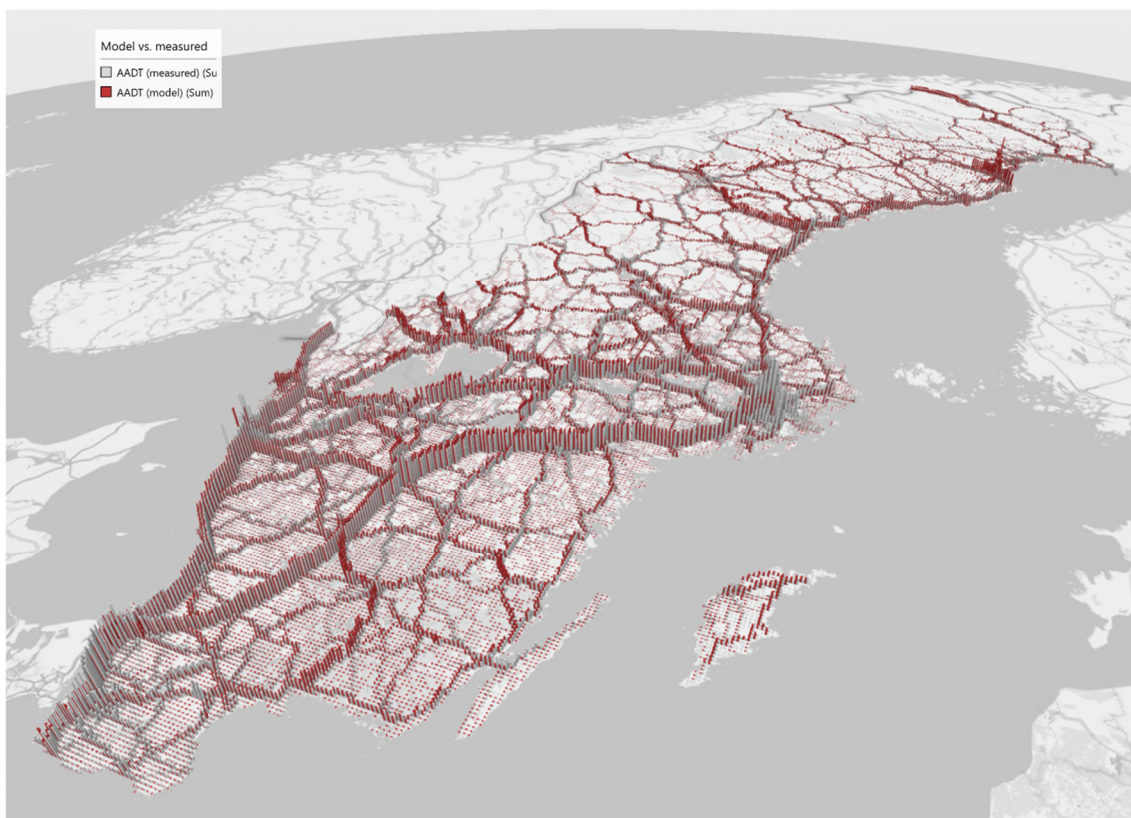
som exempelvis används för rundvirkestransporter. Bil med 3 axlar och timmersläp med 4 axlar (Trafikverket, 2020).

För varje godsflöde som börjar och/eller slutar i en kommun eller större region drar vi tio slumpvis valda koordinater ur en fördelning baserad på befolkningstäthet (i upplösning 1 km²), vilket totalt ger ca 2 000 000 koordinatpar. Antalet transporter som krävs för godsflödet fördels jämnt mellan dessa tio par av koordinater. Befolkningstäthet är den information vi har tillgång till som vi antar har bäst korrelation med platser varifrån och dit lastbilar kör, men användningen av denna proxyvariabel begränsar starkt vilka uttalanden vi kan göra om trafiken på vägnäten inom städer. I olika experiment har olika stora sampel av dessa två miljoner koordinatpar använts, för att göra beräkningstiden hanterbar. Inga större avvikelser har observerats i relativ trafikmängd på olika vägar med samplingsfrekvenser över fem procent (ca 100 000 koordinatpar per fordonsviktklass).

Efter att vi delat upp och berikat trafikdatasetet med start- och slutkoordinater har vi använt verktyget Open Source Routing Machine (OSRM)² för att hitta kortaste vägen längs vägnätet i kartdatabasen OpenStreetMap³ mellan varje koordinatpar. Vägar i OpenStreetMap består av sammanlänkade mycket korta delsegment. Eftersom godstransporter inte nyttjar hela vägnätet har dessa delsegment grupperats till obrutna segment som representerar hela sträckan mellan två observerade korsningar. För varje sådant segment lagras information om segmentets längd, tillåtna hastighet och om vägen är dubbelriktad eller inte. Kurvatur, väglutning och antal filer hanteras inte i modellen i dagsläget och en bättre datakälla än OpenStreetMap skulle krävas för att få tillgång till tillförlitlig heltäckande information om dessa vägegenskaper. Efter detta beräkningssteg representeras en rutt som en lång sekvens av diskreta vägsegment, där olika rutter kan ha vissa vägsegment gemensamma.

² <http://project-osrm.org/>

³ <https://www.openstreetmap.org/>



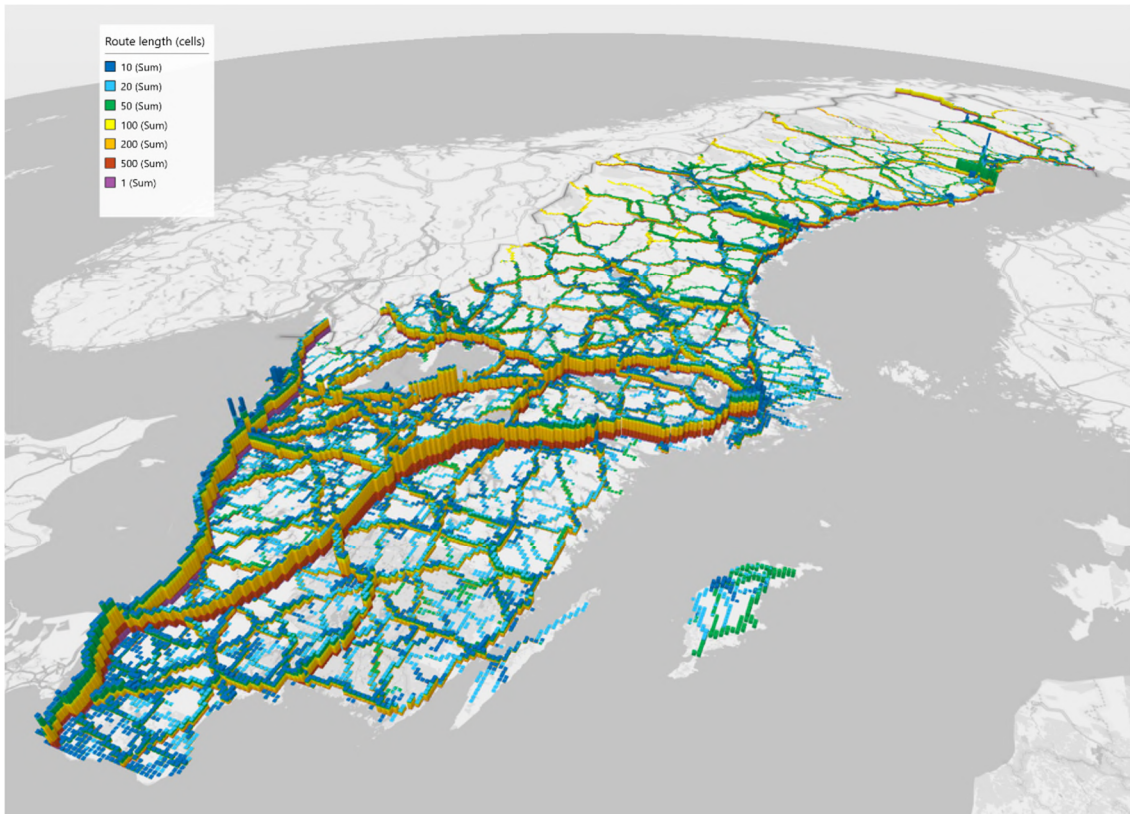
Figur 1. Överensstämmelse mellan uppmätt tung årsdygnstrafik (grå) och simulerad årsdygnstrafik (röd), efter viss kalibrering. Stapelhöjden motsvarar antal fordonspassager med tunga lastbilar per dygn. Vår bedömning är att korrelationen är mycket god, utom i storstadsområdena där den simulerade trafiken är betydligt lägre än den uppmätta. En möjlig förklaring är att uppmätt tung trafik även räknar in bussar, vilka inte ingår i den simulerade trafiken. För sträckan Värnamo-Karlshamn överskattas trafiken kraftigt i det simulerade datasetet. Vi tror att det beror på att trafik mellan Centraleuropa och Stockholm ruttats av OSRM via hamnen i Karlshamn i stället för hamnen i Nynäshamn. Avvikelsen runt Skellefteå har inte undersökts närmare.

Genom att summera trafiken från alla rutter får vi det totala antalet fordonspassager per år per vägsegment. Sådan data finns beräknad baserad på punktmätningar för nästan hela det svenska vägnätet i form av årsdygnstrafik (ÅDT, uppdelad på tunga och lätta fordon), vilken kan ge en indikation på hur väl vårt trafikdataset överensstämmer med den verkliga trafiken på vägarna. Eftersom dessa två dataset använder olika representationer för vägnätet är det svårt att på ett tillförlitligt sätt matcha exakt rätt vägavsnitt i ett dataset till dess motsvarighet i det andra datasetet och felmatchningar mellan större och mindre vägar leder lätt till väldigt missvisande kvalitetsmått. I stället valde vi att för respektive dataset dela upp världen i ett finmaskigt rutnät och inom varje ruta identifiera den väg som har mest trafik. Resultatet, efter viss kalibrering, visas i Figur 1.

Figuren visar endast den trafik som går inom Sverige, vilket också är de data som används senare i beräkningarna. Gränsöverskridande rutter klipps av vid gränsen, vilket ur simuleringsperspektiv får resultatet att tillgången till laddinfrastruktur antas vara lika utomlands som inom Sveriges gränser.

Figur 2 visar en uppdelning av samma trafikdata efter ruttens längd, vilket ger en kvalitativ indikation om hur väl datasetet fångar körbeteenden som lokala, regionala och fjärrtransporter. Baserat på författarens egen erfarenhet av att arbeta med uppmätt GPS-

data från verkliga lastbilar på det svenska vägnätet spekulerar vi att andelen distributionstrafik (blå-grön) runt större städer är mindre i trafikdatasetet än i verkligheten. Vi har inte hittat någon framgångsrik metod att korrigera denna skevhet och heller ingen bra metod att avgöra vad rätt andel är.



Figur 2. Uppdelning av samma simulerade trafik som i Figur 1 på ruttens längd, här mätt i enheten antal celler i rutnätet. Stapelhöjd motsvarar maxvärdet på beräknad ÅDT för vägsegmenten i varje cell. Baserat på författarens egen erfarenhet av att arbeta med uppmätt GPS-data från verkliga lastbilar i samma geografiska region spekulerar vi att mängden distributionstrafik (blå-grön) underskattas i förhållande till mängden fjärrtrafik (gul-röd) på vägarna i och kring större städer, men vi kan inte verifiera eller kompensera för detta.

2.2 Utbyggnadsordning för statisk och dynamisk publik laddinfrastruktur

Ett fast antal kilometer elväg skapar olika nytta i transportsystemet beroende på vilken del av vägnätet som elektrifieras, och marginalnyttan av att elektrifiera ett visst vägsegment beror av vilka vägsegment som tidigare elektrifierats. Detta eftersom nyttan av att elvägsutrusta fordon som trafikerar en viss rutt initialt är negativ och ökar i takt med att mer elväg blir tillgänglig längs ruttan. En nyttomaximerande utbyggnad av elvägar på ett större vägnät tar hänsyn till dessa nätverkseffekter. Nätverksberoendena gäller för alla typer av laddinfrastruktur och är inte begränsade till elvägar, men möjligheterna till centraliserad koordinering av utbyggnaden av elvägar antas vara betydligt större för elvägar än för annan laddinfrastruktur.

Ur ett beräkningsperspektiv är detta ett så kallat NP-svårt optimeringsproblem, vilket i praktiken får konsekvensen att vi inte kan förvänta oss att någon algoritm utvecklas som löser optimeringsproblemet en gång för alla. Det är däremot möjligt att ta fram olika

algoritmer och utvärdera dessa med avseende på hur bra lösningar de lyckas beräkna fram, enligt väl valda definitioner av vad som är bra. Ur ett återigen praktiskt perspektiv är det sannolikt inte möjligt, kanske inte ens önskvärt, att centralt koordinera all utbyggnad av laddinfrastruktur, men på grund av problemets mycket höga komplexitet bör det kunna vara värdeskapande att staka ut den övergripande riktningen med algoritmstöd.

Analyserna i denna rapport använder en i förväg bestämd ordning för utbyggnaden av elvägar längs det svenska vägnätet. Utbyggnadsordningen har beräknats enligt algoritmen nedan, beskriven i pseudokod, och maximerar synergier mellan redan byggd elväg och ny elväg, men tar inte hänsyn till placering av eller tillgång till annan laddinfrastruktur. Synergier definieras här som de vägsegment prioriteras där mest trafik går som också går på den redan byggda elvägen. Den resulterande ordningen presenteras i Figur 3. Ett norrgående och ett södergående vägsegment strax söder om Helsingborg har valts som startpunkt, för att maximera synergieffekterna med elvägar i de södra grannländerna.

Startår, utbyggnadshastighet, total storlek på det elektrifierade vägnätet, elektrifieringsgrad (hur tätt elväg installeras) och elektrisk effekt varierar i experiment.

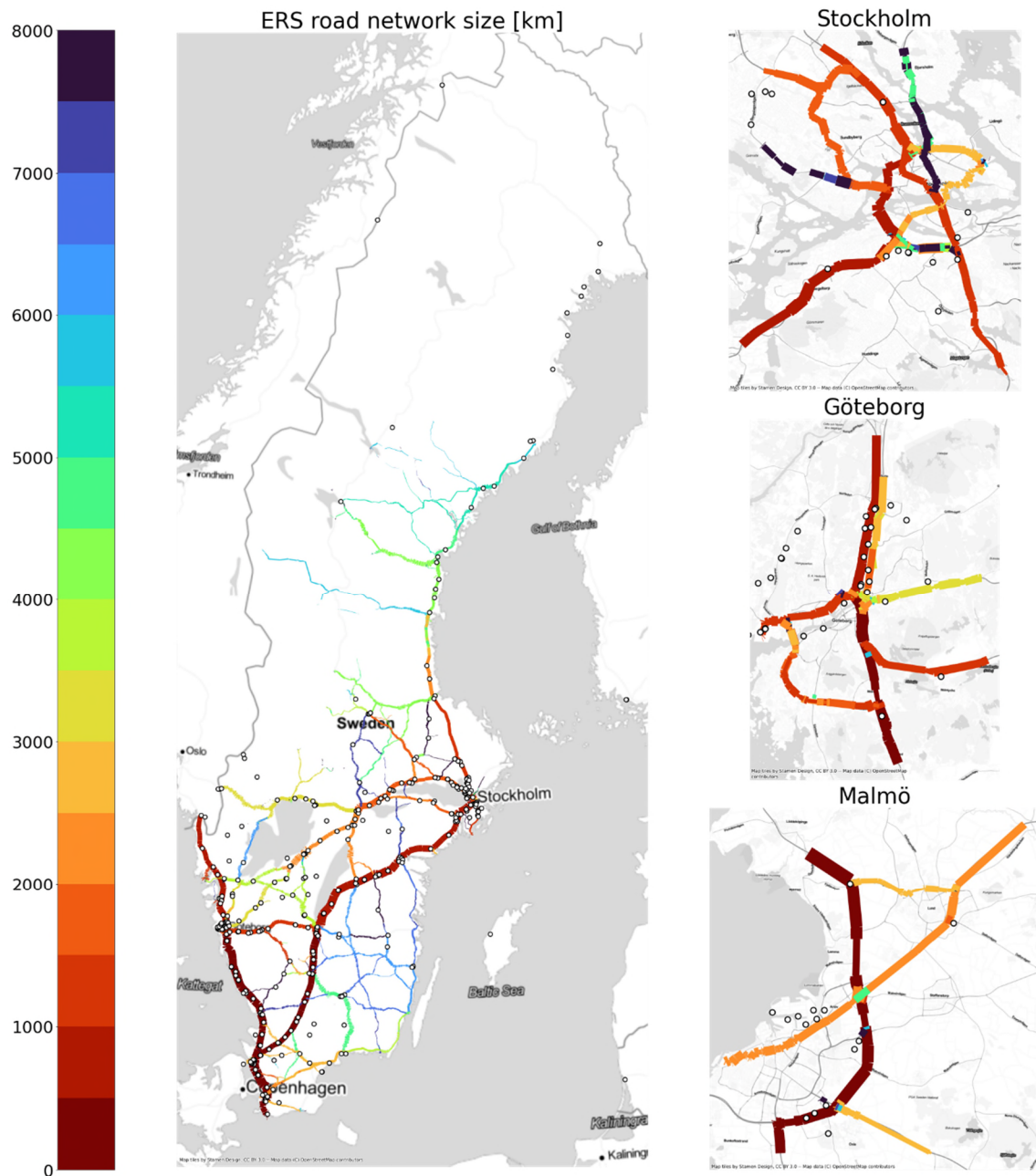
```

Algorithm to calculate the build-out order of electric roads
Create an index  $I_A: (S_a, S_b) \rightarrow W_{ab}$ ,  $b > a$  of association strength  $W_{ab}$  between pairs of road segments  $(S_a, S_b) \in S$ 
Create an index  $I_T: R_x \rightarrow T_x$  of total number of annual trips  $T_x$  for each route  $R_x \in R$ 
Discard all  $R_x$  with trip count  $T_x < 150$  or segment sequence length  $|S_R| < 100$ 
Build an index  $I_R: C_a \rightarrow (C_b, S_x)[\ ][\ ]$  of all routes  $R_0$  that go between two grid cells  $(C_a, C_b) \in C$ 
For each grid cell  $C_i$ , in parallel:
... For each route  $R_j$  departing from  $C_i$ :
... .. Make a set  $S$  of all the segments traversed by  $R_i$ 
... .. If a route  $R_r$  pointing in the opposite direction to  $R_j$  exists:
... .. .. Get  $R_r$  from  $I$  and add the segments in  $R_r$  to  $S$ , with repetition
... .. Take a random sample  $S^*$  of 100 road segments from  $S$ 
... .. Remove repeating items from  $S^*$ 
... .. For each pairwise combination  $(S_a, S_b)$  of segments in  $S^*$ :
... .. .. Increment the association strength  $W_k$  in  $I_A$  for  $(S_a, S_b)$  by  $T_x$  from  $I_T$ 
... .. After every 10k pairs of  $(C_s, R_s)$ , pause the parallel loop and:
... .. .. Discard all  $(S_a, S_b) \in I_A$  where  $W_{ab} < \max(W)/1000$ 
Discard all  $(S_a, S_b) \in I_A$  where  $W_{ab} < 2000$ 
For each segment  $S_a$  in  $I_A$ :
... Discard all but the top 100 associations  $(S_a, S_b)$  from  $I_A$  in descending order by  $W_{ab}$ 
Build a graph  $G$  representing the node-edge relationship of  $I_A$ :
... Edges  $E_{ab} \in E$  represent a road segment pair  $(S_a, S_b)$  with weight  $W_{ab}$ 
... Set  $E^a \in E$  contains all edges connected to node  $S_a$ 
... Set  $E^b \in E^a$  is the subset of edges that connect  $S_a$  to another already marked segment  $S_b$ 
... Nodes  $S_a \in S$  represent road segments, with properties  $V_a$ ,  $V_a^*$ : and  $marked \in [\text{true}, \text{false}]$ 
... ..  $V_a = \sum W_{ab}$  over  $E^a$  (kept constant)
... ..  $V_a^* = \log(V_a) * \sum W_{ab}$  over  $E^a$  (updates when a neighbor gets marked)
... ..  $V_a^*$  is initialized to a random number  $r \in [0,1]$ 
Start with a seed of marked road segments
Create a list  $L$  of all nodes, sorted in ascending order of  $V_a^*$ 
Create a list  $O$  containing the segment build out order
While  $|L| > 0$ :
... Mark the last item  $S_x$  in  $L$  and remove it from  $L$ 
... Append  $S_x$  to  $O$ 
... Resort  $L$ 

```

Snabbladdarstationer kan i simuleringsmodellen placeras ut vid 424 platser i Sverige där många lastbilar stannar, vilka pekats ut i en tidigare analys med utgångspunkt från verkliga GPS-data från uppkopplade lastbilar (Plötz & Speth, 2021). Dessa platser indikeras i Figur 3 som vita cirklar med svart kant. Ordningen för utbyggnad av snabbladdarstationer utgår från mängd trafik på det mest trafikerade vägsegmentet inom en radie på 1,5 km, i minskande ordning.

Laddinfrastruktur vid lastbilsdepåer och destinationer placeras ut i slumpvis ordning i ett finmaskigt rutnät. Alla rutter som utgår från samma ruta antas utgå från samma depå och alla rutter som avslutas i samma ruta antas avslutas vid samma destination. Denna metod har valts eftersom all laddinfrastruktur har en baskostnad som får onaturligt stor påverkan på kostnaden för laddning om för små anläggningar byggs. Logiken baseras även på att förutsättningar för att bygga ut statisk laddinfrastruktur till stor del bestäms av lokala förutsättningar i elnätet.



Figur 3. Förberäknad utbyggnadsordning för elvägar, i ordning röd till blå. Kartan visar ett vägnät upp till 8 000 km dubbelriktad väg. Vägsegmentens tjocklek är proportionerlig mot antal fordonspassager per tidsenhet. Utbyggnadsordning i storstäderna är den som använts i studien. På grund av begränsningar i kvaliteten på de trafikdata som använts bör stadskartorna främst ses som en indikation på att urbana vägnät bör ingå relativt tidigt i en utbyggnadsplan för elvägar, även om en teknik väljs som endast kan användas av lastbilar. Stadskartorna ger även en indikation om vilka vägar som kan vara aktuella. Svarta cirklar indikerar totalt 424 platser utpekade i tidigare forskning där snabb-laddarstationer kan placeras.

2.3 Simuleringsmodell

För att kunna mäta och studera olika former av interaktionseffekter mellan elvägsinfrastruktur och det övriga transportsystemet har en simuleringsmodell tagits fram. Denna modell hanterar utöver elvägar (dynamisk laddning) tre typer av

infrastruktur för laddning av stillastående fordon (statisk laddning): vid lastbilsdepå, vid ruttdestinationer och vid naturliga rastplatser längs rutten.

Konceptuellt är simuleringsmodellen enkel. Först definieras ett scenario, i form av antaganden om mellan vilka år och i vilken omfattning olika typer av laddinfrastruktur kan byggas ut. Därefter identifieras för varje enskild rutt vilken drivlina (diesel eller batterielektrisk) som minimerar kostnaden för de årliga transporterna längs rutten, och om detta är en elektrisk drivlina, även vilken kombination av batteristorlek och platser att ladda som är kostnadsminimerande. När fordon och laddbeteenden kostnadsoptimerats oberoende av varandra summeras all laddning till en total efterfrågan (toppeffekt per plats), som resulterar i byggd laddinfrastruktur. Genom att experimentera främst med olika kombinationer av laddinfrastruktur och jämföra förändringar i simuleringsresultat kan olika former av interaktionseffekter mätas. En överblick av logiken i modellen ges i Figur 4.

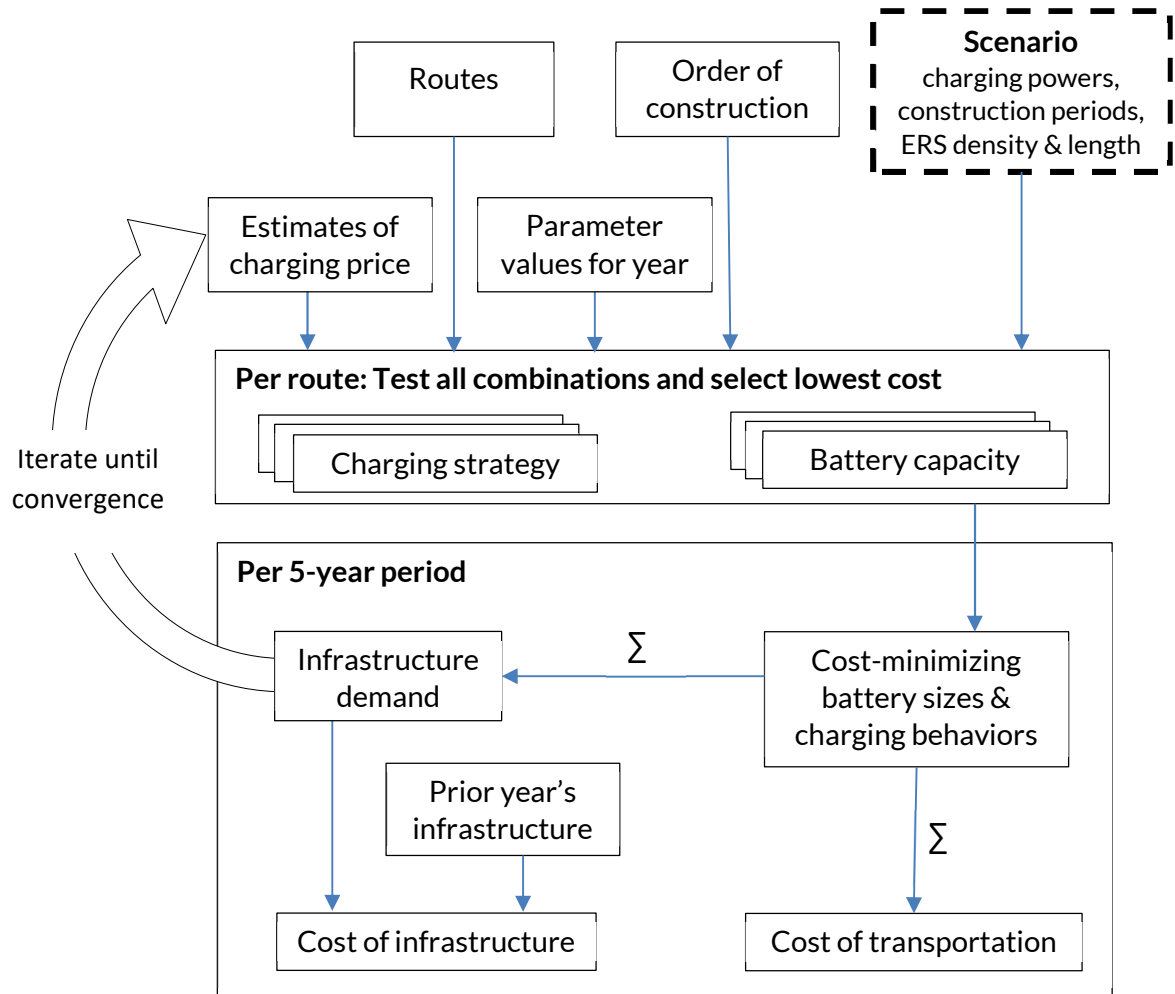
För laddinfrastruktur av alla typer finns skalfördelar, så att större anläggningar ger lägre kostnad per levererad enhet energi. Dessa skalfördelar är i praktiken obetydliga för depåladdning och destinationsladdning, av viss betydelse för snabbbladdarstationer och av mycket stor betydelse för elvägar. Att kostnaden för laddning vid en plats beror av hur många fordon som laddar där, deras batterikapacitet och batteriernas laddnivå vid laddsessionens början hanteras i simuleringen genom iteration till konvergens. Brukarkostnader initieras med en gissning, kostnadsminimerande laddmetoder väljs för varje rutt, total efterfrågan på infrastruktur beräknas och brukarkostnader uppdateras. Laddinfrastruktur förhindras att byggas om den resulterande lokala brukarkostnaden i detta steg visat sig vara mer än fem ggr medelkostnaden för all laddinfrastruktur av den typen. Simuleringen upprepas sedan. När fördelningen av energiuttag mellan de olika laddmetoderna stabiliserats antas beräkningen ha konvergerat och iterationen avbryts. Laddinfrastruktur som fanns på plats sedan föregående simuleringsår följer alltid med och bidrar till systemkostnaden, oavsett om den efterfrågas nästa år eller inte.

För elvägar resulterar denna självreglering oftast i att något färre km elvägsinfrastruktur byggs än vad som erbjuds i scenariot, på grund av att nyttjandet av infrastrukturen på vissa vägsegment varit avvikande låg. Andelen som inte byggs ökar för ökande storlekar på det elektrifierade vägnätet och redovisas separat i det experiment där det bedömts vara viktigt för tolkningen av resultaten. Självregleringen resulterar också i avsteg från den förberäknade utbyggnadsordningen, då elväg inte byggs på alla segment i det utpekade vägnätet.

Metoden att erbjuda laddning vid många platser, beräkna beteende per rutt oberoende av andra rutters beteende och summera efterfrågan är tänkt att representera en fri marknad med oberoende beslutsprocesser, där fordonsägare själva väljer vilka fordon de vill köpa och var de vill ladda och många laddinfrastrukturoperatörer kan etablera konkurrerande infrastruktur på olika platser för att möta denna efterfrågan. Lösningar som är mer resurseffektiva på systemnivå kan mycket väl finnas, men det är oklart vilka incitamentsstrukturer som kan få systemet att konvergera i en fullt ut koordinerad riktning.

Simuleringsmodellen består av några tusen rader källkod och att fullt ut beskriva dess logik är inte möjligt i denna rapport, varför beskrivningen fokuserar på delar av särskilt stor betydelse för tolkning av de utförda experimenten. Källkoden till modellen kommer

att publiceras vid ett senare tillfälle, i syfte att möjliggöra fullständig granskning, återanvändning och förbättring av implementationen.



Figur 4. Flödesschema över hur total kostnad för transporter och laddinfrastruktur beräknas i simuleringsmodellen.

2.3.1 Begreppsdefinitioner

Vägsegment, depå, destination, rastplats, laddstation: Ett vägsegment är ett kort avsnitt av en väg mellan två korsningar, beräknat enligt beskrivningen i avsnitt 2.1. Lastbilsdepåer, destinationer och rastplatser hanteras som vägsegment utan längd. Depåer och destinationer existerar i ett finmaskigt rutnät, där alla rutter som utgår från samma cell i rutnätet antas utgå från samma depå. Rastplatser har koordinater som länkats till alla vägsegment inom en kvadrat på en kilometer. Vissa depåer, destinationer och rastplatser är utrustade med laddinfrastruktur. I rapporten används även uttrycken station, laddstation eller snabbbladdarstation. Dessa är synonyma med laddinfrastruktur placerad vid en rastplats.

Rutt: En sekvens av vägsegment som beskriver en riktad förflyttning längs vägnätet. Varje rutt är associerad med metadata som beskriver hur många ton gods som fraktas och hur många lastbilstransporter som går längs ruten per år, per fordonsviktklass. Det första vägsegmentet i en rutt är alltid en depå och det sista alltid en destination. Första gången en rutt passerar i närheten av en rastplats läggs rastplatsen in i ruten. I

simuleringen sker beräkningen per rutt stegvis längs varje rutt och batterinivån uppdateras för varje steg.

Fordon, lastbilar: Simuleringen hanterar endast lastbilar. De trafikdata vi använt innehåller ingen information om individuella lastbilars användning. I simuleringsmodellen görs antaganden om och beräkningar av olika fordonsrelaterade kostnader, vilka räknas om till kostnad per fordonskilometer eller kostnad per fordonsår och appliceras på rutten. Fordon antas alltid vara utrustade med den teknik som gäller för den aktuella femårsperiod för vilken simuleringen beräknas: ett avsteg från verkligheten som gjorts för att förenkla beräkningarna. Lastbilar i fyra viktklasser ingår: MGV16, MGV24, HGV40 och HGV60 (se avsnitt 2.1).

Batteripack: Batterielektriska fordon är utrustade med batteripack, för vilka många parameterantaganden kring prestanda och kostnad har gjorts för varje femårsperiod i modellen. Kostnadsminimerande kombination av kapacitet (i kWh) på batteripacket och laddstrategi beräknas individuellt för varje rutt, fordonsviktklass och simuleringsperiod. Energinivån i ett batteripack uppdateras sekventiellt för varje vägsegment längs en rutt. Beräkningen initieras vid depå med ett halvfyllt batteri och tid för depåladdning motsvarande ruttens andel av total daglig drifttid. Om energinivån når noll är denna rutt inte möjlig att köra i batterielektriskt utförande med den konfigurationen. För den tekniskt intresserade kan det vara viktigt att påpeka att när lagringskapacitet anges i rapporten handlar det alltid om nettokapacitet, det vill säga den kapacitet som går att nyttja av fordonsanvändaren. Källor till parametervärden anger oftast bruttosiffror, alltså vid antagande om 100 % depth-of-discharge, vilka räknats om till nettosiffror i modellen baserat på angivet SoC-fönster.

Laddstrategi: Längs en rutt kan laddinfrastruktur erbjudas på många platser, där laddning erbjuds till olika direkt och indirekt kostnad. Vid god tillgång till laddinfrastruktur finns inget behov att ladda på alla platser där möjlighet ges. För en enskild rutt väljs därför den kombination av batteripack och laddstrategi som är kostnadsminimerande, givet den laddinfrastruktur som erbjuds. När ett fordon laddar vid elväg sker det vid elvägens effekt, minus effekt för framdrift, eventuellt begränsat av vad batteripacket kan ta emot. När ett fordon laddar stillastående sker det vid den lägsta av infrastrukturens effekt, batteriets högsta tillåtna laddeffekt och den lägsta effekt som krävs för att nå full laddning innan avfärd. Följande laddstrategier utvärderas:

- **NA_Diesel:** Fordonet är utrustat med en dieseldrivlina.
- **Depot:** Fordonet laddar endast vid depå.
- **DepotAndErsPropulsion:** Fordonet laddar endast vid depå, men tar energi från elväg (Electric Road System, ERS) för direkt framdrift av fordonet.
- **DepotAndErsCharging:** Fordonet laddar vid depå och elväg.
- **AllPlannedStops:** Fordonet laddar vid depå, destination och när föraren tar lagstadgad rast efter 4,5 h körning. Rast kan tas upp till 30 minuter tidigare om det möjliggör laddning vid en rastplats, annars stannar fordonet längs vägen.
- **AllPlannedStopsAndErs:** Som föregående, men fordonet kan även ladda på elväg.
- **ERS:** Rutten där laddning efter simulering endast skett från elväg. Utvärderas ej separat.
- **PublicStaticCharging:** Rutten där laddning efter simulering endast skett vid elväg och rastplatser. Utvärderas ej separat.

Scenario: Ingångsdata till en simulering, som definierar under vilka år laddinfrastruktur av respektive typ byggs ut, och vid vilken nivå av tillgång som utbyggnaden avbryts. Definierar även de diskreta batterikapaciteter som ska utvärderas, erbjuden laddeffekt per fordon per typ av laddinfrastruktur, samt elektrifieringsgrad för en elväg. Om inget annat anges har laddeffekterna 100, 500, 750 och 300 kW använts för depåladdning, destinationsladdning, stationsladdning samt elväg. Batterikapaciterna 75*, 150**, 250, 450, 700 och 1 000*** kWh har använts (*endast MGV, **ej HGV60, ***endast HGV).

Modellår eller simuleringsår: En femårsperiod benämnd med det första året i perioden, för vilken alla modellparametrar skattats. Studien omfattar modellår 2020 till 2050.

Systemkostnad: Summan av alla ingående kostnadskällor i simuleringen (se avsnitt 2.3.2), för hela landet, vanligtvis under ett år. Ingen inflation eller omräkning till nuvärdet tillämpas, eftersom fokus ligger på att förstå interaktionseffekter i systemet.

Transportkostnad: Kilometerkostnaden eller årskostnaden för att trafikera en rutt. Kan delas upp i kostnader för fordon, fordonsbatterier, förare, bränsle, elektrisk energi, brukaravgifter för laddning och lånat kapital.

Laddinfrastruktur: Delas upp i infrastruktur för laddning av stillastående fordon ("statisk laddinfrastruktur") och fordon i rörelse ("dynamisk laddinfrastruktur" eller "elvägar"). Inkluderar kostnader för hårdvara, installation, underhåll, nätanslutning, löpande nätavgifter och ränta på investerat kapital. Alla kostnader fördelas jämnt över beräknad levererad energi under hela infrastrukturens förväntade tekniska livslängd, vilket leder till en underskattning av brukarkostnaden om annan konkurrerande laddinfrastruktur tillförs som gör anläggningens ekonomiska livslängd mycket kortare än dess tekniska livslängd. Den uppskattade brukarkostnaden påverkar valet av laddstrategi, men inte systemkostnaden. I modellen används termerna erbjuden laddinfrastruktur och byggd laddinfrastruktur, där ett erbjudande innebär att fordon kan välja att ladda på en plats, vilket i så fall leder till att infrastruktur byggs och bidrar till systemkostnaden.

Utbyggnadsordning: Den ordning i vilken laddinfrastruktur erbjuds på nya platser i en simulering av utbyggnad över flera år. Hanteras genom att varje plats tilldelas ett tidigaste år från vilket det erbjuds möjlighet att ladda.

Elväg och elvägnät: Elväg är laddinfrastruktur som möjliggör både kontinuerlig batteriladdning och el direkt till fordonsframdrift under körning på väg. Inga antaganden görs om vilken elvägsteknik som används. I stället har tekniska specifikationer och prisprognoser från olika teknikleverantörer approximerats med en gemensam modell som ger en kostnad vid en given laddeffekt. Elvägnätet är den delmängd av hela vägnätet där elväg installeras. Om elvägen erbjuder hög laddeffekt möjliggör detta att elvägen kan installeras i intervall, för att sänka kostnaden med bibehållen levererad elektrisk energi per körd sträcka. Terminologin för detta i denna rapport är att elektrifieringsgraden sänks genom att elväg installeras på delar av elvägnätet.

Parametervärden: En stor uppsättning numeriska antaganden om kostnader och tekniska egenskaper. Dessa är olika för olika år i simuleringen men hålls konstanta mellan olika experiment. Se avsnitt 2.4.

2.3.2 Ingående kostnadskällor

Detta avsnitt beskriver hur olika delsystem och deras inbördes relationer representeras i simuleringsmodellen, samt hur dessa tillsammans bidrar till den beräknade systemkostnaden och den företagsekonomiska kostnadsberäkning som används för kostnadsminimering per transportrutt. För en fullständig beskrivning av modellens logik hänvisas intresserade läsare till modellens källkod, som kommer att publiceras.

Räntekostnader: Alla kostnader i modellen räknas om till kostnader per kilometer eller per år, för att kunna summeras för total trafik per rutt systemet som helhet. På alla kapitalinvesteringar tillämpas olika nivåer av räntekostnader, där statliga investeringar har lägst ränta och små privata företag har högst ränta.

Fordonsbatterier: Utvecklingen över tid för fordonsbatterier representeras av antaganden om både förändringar i inköpskostnad, residualvärde, livslängd och tekniska prestanda. Dominerande batterikemier antas vara okända och ändras över tid, varför parameterantaganden har gjorts utifrån prestandaegenskaper på högre nivå. Källan till dessa prognoser är främst diskussioner med ca 10 experter som på något vis arbetar med fordonsbatterier, där personerna fått uttrycka sig om hur de tror att parametrarna kommer att utvecklas tillsammans, eftersom flera parametrar är kemiskt sammankopplade på sätt som författaren till denna rapport saknar kompetens att redogöra för. Konsekvensen av att beräkna total ägandekostnad på detta vis är dels att laddinfrastrukturens utformning påverkar batteriets livslängd, dels att ägandekostnaden för batterier sjunker snabbare än vad inköpspriset gör (se avsnitt 3.2).

Batteriparametrar som valts är: inköpspris per kWh batterikapacitet, kalenderlivstid, cykellivstid, normal c-rate för laddning och urladdning, maximal tillåten c-rate för laddning och urladdning, state-of-charge-fönster⁴, specifik energi samt energitäthet. C-rate beräknas som kW laddeffekt per kWh batterikapacitet. Utöver dessa parametrar har antaganden gjorts för eftermarknadsvärdet för batterier (baserat på år batteriet tas ur bruk, inte tillverkningsår), CO₂e-utsläpp per kWh från produktion och grad av kapacitetsförlust vid vilken batteripack anses vara uttjänt. Batteripack i fordon måste ha tillräcklig kapacitet för att möta fördefinierade krav på uteffekt, medan krav på körsträcka och laddeffekt bestäms genom simulering.

Alla batterier i modellen utsätts för kalenderåldring, vars takt endast beror av tillverkningsår. Cykelåldring beräknas för varje vägsegment⁵ som passeras som

⁴ Fordonsbatterier slits snabbare och har sämre prestanda när de är nästan fullt laddade eller nästan helt urladdade. För att i modellen kunna anta konstanta batteriprestanda oberoende av aktuell laddnivå tillämpas ett SoC-fönster, vilket är det intervall inom vilket batteriets energinivå tillåts röra sig. I verkligheten finns även andra tekniska och beteendestyrande lösningar för att undvika extrema laddnivåer, men alla har gemensamt att den tillgängliga lagringskapaciteten för ett batteripack i praktiken är lägre än den totala kapacitet som installerats i fordonet.

⁵ Depåer, destinationer och rastplatser hanteras som vägsegment utan längd. Laddning erbjuds vid de vägsegment där laddinfrastruktur installerats och laddning sker om vald laddstrategi tillåter det.

$$a_{cyc} = \frac{1}{2} \cdot e \cdot \max\left(0,75; \left(\frac{c}{c_{ref}}\right)^2\right),$$

där a_{cyc} är andel kapacitetsförlust, e energi tillförd genom laddning, c är c-rate för laddning, c_{ref} är normal c-rate för laddning. Laddning och urladdning tillåts med effekter upp till 50 % över c_{ref} . Referensnivån för urladdning antas vara 50 % högre än för laddning. Energi mäts i kWh och övriga parametrar är dimensionslösa. Konstanten $1/2$ finns med eftersom en full cykel består av både laddning och urladdning. Åldringsmodellen för batterier är en svag punkt i studien, eftersom modellering av batteriåldring fortfarande är ett aktivt forskningsområde. Denna ekvation har valts för att kunna parametersätta åldringstakten, för att högre laddeffekt ska slita mer på batterier, och för att mycket låga laddeffekter fortfarande ska resultera i visst slitage. Total batteriåldring per tidsenhet är summan av kalenderåldring och cykelåldring. Den laddeffekt som används är den lägsta av vad batteriet klarar att ta emot, vad infrastrukturen klarar att leverera och vad som behövs för att fylla batteriet på tiden fordonet vistas på platsen.

Lastbilar: Kostnaden för lastbilar består av inköp, underhåll, livslängd och eftermarknadsvärde. Inköpskostnaden för batterielektriska lastbilar anges exklusive batteri. Livslängden för dieslbilar är konstant (7-10 år), medan livslängden för batterielektriska lastbilar ökas gradvis till 12-15 år. Inga trovärdiga vetenskapliga källor har identifierats för livslängden på batterielektriska lastbilar och detta val baseras därför på diskussioner med de två svenska fordonstillverkarna. Argumentationen är att motor och drivlina är de komponenter som begränsar livslängden på dagens lastbilar, medan övriga delar faller under löpande reparationer och underhåll. Elmotorer har mycket lång livslängd. Batterier antas ha en livslängd minst lika lång som lastbilen, eller vara utbytbara. Att elfordons livslängd gradvis blir längre än motsvarande dieselfordon innebär en ekonomisk fördel för elfordon. Underhållskostnaden för batterielektriska fordon antas vara 40 % av motsvarigheten för dieselfordon, exklusive kostnaden för däck.

Förarkostnader: Tillämpas per tidsenhet, exklusive tid vid depå.

Fordonsvikt: När diesellastbilar ersätts av batterielektriska motsvarigheter ändras fordonets vikt, vilket påverkar hur mycket gods fordonet som mest är tillåtet att frakta per resa. Eftersom många transporter är volymbegränsade i stället för viktbegränsade har halva viktdifferensen använts för att justera hur många resor per år som behöver genomföras per rutt för att frakta samma mängd gods. Denna kompensation har en liten men inte obetydlig påverkan på systemets utformning och premierar lättare fordon. Bränsleförbrukningen har inte antagits påverkas av skillnader i fordonsvikt, eftersom lastvikten antas öka.

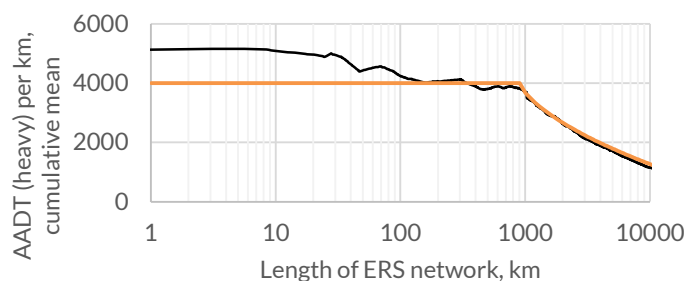
Bränslekostnader: Utgörs av kostnaden för antingen diesel eller elektrisk energi. Råvarukostnaden har uppskattats för fossil diesel och biodiesel och ökande reduktionsplikt har antagits. Kostnaden för AdBlue har inte tagits med i beräkningarna. Kostnaden för el har angivits per nätområde och för dag- respektive natlladdning. För varje typ av laddinfrastruktur har en nyttjandegradskurva uppskattats för dygnets timmar, vilken använts för att beräkna ett snittpris för el per laddinfrastrukturalternativ. Dagens bränsleskatter har efter bästa förmåga delats upp i CO₂-skatt och trafikskatt, där trafikskatten räknats om till en kilometerskatt som är lika oavsett drivmedel.

Trafikskatten ingår endast i den företagsekonomiska kalkylen som används för att minimera kostnaden per rutt, inte i summeringen av systemkostnaden.

CO₂-utsläpp: Växthusgasutsläpp uppstår vid förbränning av diesel och den CO₂-skatt som nämns i föregående punkt anges som en gradvis ökande andel av samhällskostnaden för CO₂-utsläpp. CO₂-skatt tillämpas i den företagsekonomiska beräkningen på aktuell blandning av fossil och förnybar diesel samt el. I den samhällsekonomiska beräkningen tillämpas hela samhällskostnaden för utsläppen och då även på utsläpp från batteriproduktion.

Laddinfrastruktur: Två modeller används för beräkning av kostnaden för laddinfrastruktur – en för all statisk laddning och en för elvägar. Parametrarna för statisk laddning är en baskostnad, en kostnad per kW maximal simultan laddeffekt från anläggningen, underhållskostnad (andel av installationskostnad per år), teknisk livslängd och vinstmarginal. Nätanslutningskostnad och löpande nätavgifter tillkommer och beräknas på samma sätt för all laddinfrastruktur. Samma nätkostnader har antagits i hela landet. För elvägar anges alla kostnader per km elektrifierad dubbelriktad väg. Dessa utgörs av en hög fast grundkostnad, en låg kostnad per kW topp effekt, underhållskostnad (andel av installationskostnad per år), teknisk livslängd och vinstmarginal. Kostnaden multipliceras med risken att elvägen behöver byggas om på grund av val av fel laddgränssnitt och med merkostnaden för en sådan ombyggnation. Risken är hög modellår 2020 och minskar sedan snabbt, men straffar utbyggnad av elvägar innan Europa enats om en gemensam standard.

För all laddinfrastruktur har initiala uppskattningar av nyttjandegrad gjorts som används för att estimerar brukarkostnaden för laddning vid varje plats. För varje modellår körs simuleringen först en gång för att skatta nyttjande av laddinfrastruktur vid varje möjlig plats. Baserat på detta justeras brukarkostnaden vid varje plats och simuleringen körs om med mer korrekta kostnader. Platser med exceptionellt lågt nyttjande som därför resulterar i exceptionellt höga brukarkostnader plockas bort innan det andra beräkningspasset. Simuleringsresultaten verkar relativt okänsliga för de initiala gissningarna. Brukarkostnaden för laddinfrastruktur är baserad på den totala kostnaden att installera, driva och underhålla infrastrukturen, fördelad på det förväntade antalet kWh som säljs över infrastrukturens tekniska livslängd, plus vinstmarginal. Initial gissning för trafik på elvägnät av olika storlekar utgår från förberäknad medel-ÅDT, enligt Figur 5. Samma vinstmarginal på 10 % har antagits för all laddinfrastruktur.



Figur 5. Kumulativt medelvärde av dubbelriktad ÅDT (tung) för ökande storlekar på det svenska vägnätet, beräknat baserat på syntetiska trafikdata och den förberäknade utbyggnadsordningen för elväg. Orange kurva är funktionen $y(x) = \text{if}\{x < 1000; 4000; 15000 - 6200 * \ln[\ln(x - 500)]\}$

2.3.3 Modellering av ett komplext system

Komplexa system är system vars beteende är svårt att modellera på grund av beroenden, synergier, konkurrens, relationer eller andra typer av interaktioner mellan olika delsystem eller mellan ett givet system och dess omgivning. System som är komplexa har distinkta egenskaper som härrör från dessa relationer, såsom olinjäritet, uppkomst (emergence), spontan ordning, anpassning och återkoppling (Wikipedia authors, 2022).

Interaktions- och återkopplingseffekter mellan olika delar av godstransportsystemet på väg gör att analyser av laddinfrastruktur bör utföras med metoder anpassade för komplexa system. Den simuleringsmodell som används i denna studie hanterar många beroenden som utelämnats i tidigare litteratur på området, vilket gör att analysresultaten inte alltid överensstämmer med tidigare resultat för de frågeställningar som andra redan besvarat.

De viktigaste interaktions- och återkopplingseffekter som hanteras är:

- Miljontals rutter på samma vägnät med olika mängd trafik för fyra olika fordonsklasser, som alla samnyttjar laddinfrastruktur, väver automatiskt in geografiska nätverkseffekter i alla analyser och möjliggör att slutsatser kan dras på både nationell, regional och lokal nivå.
- Alla kostnader beräknas ur TCO-perspektiv, även för batterier.
- Batterikostnad påverkas av batteriets åldringstakt, vilken i modellen påverkas av batteriets tillverkningsår, laddeffekt relativt batterikapacitet, andel av energi som passerar batteriet, samt kalendertid.
- Livslängden för en batterielektrisk lastbil bestäms av livslängden på fordonets batteripack, vilket gör att batterislitage bör minimeras även då batterier sjunkit i pris.
- Ett fordons vikt utan last bestämmer dess lastkapacitet och ökad lastkapacitet per fordon medför en reduktion av antalet resor per år per rutt. Halva förändringen mot dagens lastkapacitet antas påverka mängden gods per resa, eftersom många transporter är volymbegränsade snarare än viktbegränsade.
- Distribuerat beslutsfattande simuleras genom en lokal kostnadsoptimering per rutt, vilket resulterar i en aggregerad efterfrågan på fordonsladdning som styr utbyggnad av laddinfrastruktur över tid.
- Laddeffekter begränsas av både infrastrukturens konfiguration, batterikapaciteten i fordon, batteriets tillverkningsår och aktuell energinivå i batteriet. Fordon i olika viktklasser och längs olika rutter efterfrågar olika laddeffekt på samma plats, vilket styr dimensioneringen av laddinfrastrukturen. Tillförsel av nya laddmöjligheter skapar kaskadeffekter som påverkar efterfrågan på laddning vid många andra platser.
- Brukarkostnaden för laddning på olika platser styrs av faktisk nyttjandegrad på platsen, ärvd överkapacitet från föregående simuleringsperiod, tid på dygnet (elpris) och elområde (elpris). För elväg antas samma brukarkostnad för hela vägnätet och inget antagande görs om att intäkter från elvägen ska förflyttas i tid för att bekosta en tidig utbyggnad. Simuleringen i femårsperioder gör att fordon antas kunna vara anpassade för den nya infrastrukturen så fort den är på plats.
- Utbyggnaden av laddinfrastruktur är självreglerande

- Elektrifieringstakten för fordonspopulationen som helhet beror både av driftkostnad relativt diesel och tillgång på laddinfrastruktur längs varje enskild rutt.

2.4 Förenklingar och metodbegränsningar

Alla parametervärden listas i avsnitt 8. Dessa har uppskattats per femårsperiod 2020–2050 och för varje simuleringsperiod beräknas alla kostnader med de värden som hör till perioden. Att hålla reda på en blandning av fordon och laddinfrastruktur med olika tillverkningsår och olika prestanda hade gjort simuleringen betydligt mer komplex, troligtvis utan att substantiell påverkan på studiens resultat. Studien gäller framtida förhållanden, vilka alla är förknippade med någon grad av osäkerhet. Författarens bedömning är att exakta kostnader och andelar som rapporteras i experimenten alla är mer eller mindre fel och att påståenden om dominerande återkopplingseffekter är betydligt mer tillförlitliga.

Känslighetsanalys med avseende på parameterantaganden har inte ännu hunnit genomföras. Läsare som identifierat orimliga parameterantaganden ombedes kontakta författaren. Spekulativt antas elväg gynnas av högre batteripriser och större trafikmängder, och dieselfordon gynnas av lägre dieselpriiser. Elpriser och dieselpriiser är delvis sammankopplade och det är osannolikt att priset på el ökar kraftigt utan att detsamma gäller för diesel. Eftersom kostnaden för el utgör en mindre andel av de totala driftkostnaderna för batterielektriska fordon än diesel gör för dieselfordon bör en övergång till eldrift göra transportindustrin mindre känslig för prisfluktuationer på bränsle. Ingen enskild parameter har identifierats vars osäkerhetsintervall är så stort att det borde förändra slutsatserna, men vissa kombinationer av förändrade antaganden skulle antagligen kunna ha stor effekt.

Modellen av en transportrutt som depå-väg-destination är mer högupplöst än ÅDT-baserade modeller, men ändå en kraftig förenkling av verkligheten. Metoden gör ett implicit antagande om att transportuppdrag allokeras om mellan fordon och åkare i takt med förändrade förutsättningar. Åkare baserade i städer med olika förutsättningar i olika riktningar bör stå inför störst förändring av logistikmönster. GPS-data från uppkopplade fordon skulle kunna användas för att anpassa laddinfrastrukturen till dagens körmönster.

Inne i de större storstäderna har vårt dataset med transportrutter enligt vår egen utvärdering låg korrelation med både verkliga körmönster och uppmätt ÅDT. Inga slutsatser bör dras kring lämplighet att bygga elväg eller annan laddinfrastruktur på individuella platser inne i storstäderna. Samgods verkar ha stora brister kring inomkommunala transporter. Samgods verkar även underskatta andelen gränspasserande trafik. I vår analys innebär det ett implicit antagande att infrastrukturen utomlands byggs ut motsvarande den i Sverige.

Verkliga förutsättningar för depå- och destinationsladdning varierar från plats till plats. I brist på bättre data har lastbilsdepåer och destinationer placerats i ett finmaskigt rutnät, där laddinfrastruktur vid depå och destination antingen finns eller inte finns i varje ruta. Rutter som börjar eller slutar i en ruta med laddinfrastruktur kan ladda där. När laddinfrastruktur vid depåer och destinationer byggs ut över flera tidssteg ökas antalet andelen rutor med laddmöjligheter, i slumpvis vald ordning.

Batterislitage är ett mycket komplex och aktivt forskningsområde. Modellen för batterislitage är inspirerad av verkliga elektrokemiska åldringsprocesser, men är en mycket kraftig förenkling av verkligheten. Läsare som har kunskap om hur batteriåldring kan representeras på ett bättre sätt ombedes kontakta författaren.

Efter dialog med fordonstillverkare och åkerier antas batterilastbilar ha samma livslängd som motsvarande bil med dieselmotor, år 2020. Livslängden för batterilastbilar antas sedan öka linjärt till 2035. Livslängden för batteripack antas vara frikopplad från livslängden för lastbilar – antingen håller batteripacket hela lastbilens livslängd, eller så behöver batteripacket vara en reservdel som går att byta. Batteripacks livslängd beräknas dynamiskt i modellen baserat på användning. En mer komplex modell skulle ta hänsyn till att olika fordon används olika intensivt och i olika miljöer, vilket både påverkar fordonets livslängd och förhållandet mellan kapital- och driftkostnader. Alla fordon av samma viktklass har antagits ha samma årliga körsträcka, vilket gör att alla typer av extrem drift saknas. Extrema förhållanden leder ofta till att andra tekniska lösningar är kostnadsoptimala än för den stora massan.

Trots att styrkan hos denna studie påstås vara dess hantering av interaktions- och återkopplingseffekter finns många starka effekter som inte alls hanterats. Dessa bör särskilt vara kopplingen mellan pris, tillgång och efterfrågan på transporter, batterier, el och vissa nyckelkomponenter i laddinfrastruktur.

Totala räntekostnader i systemet är misstänkt stabila mellan scenarier. Vi har letat efter men inte hittat fel i beräkningarna, men antagligen finns smartare sätt att betala av sina lån än de vi antagit. Slutsatserna bör inte påverkas.

Simuleringsprogrammet består av ca 4000 rader programkod. Stora ansträngningar har gjorts för att verifiera att beräkningarna genomförts korrekt, men okända buggar i programkoden kan fortfarande finnas kvar. Vi bedömer det som osannolikt att det återstår större buggar som påverkar slutsatserna från forskningen.

Analyserna är utförda på svenska körmönster, det svenska vägnätets struktur och med parameterantaganden anpassade till svenska förhållanden. Vi har inte ännu gjort analyser för att bedöma vilka av våra slutsatser som generaliserar till andra länder. Eftersom Sverige med internationella mått mätt har höga dieselpriiser, låga elpriser och hög värdering av CO₂ är det dock rimligt att anta att samma experiment med antaganden för andra länder skulle ge en något långsammare elektrifieringstakt av transporterna.

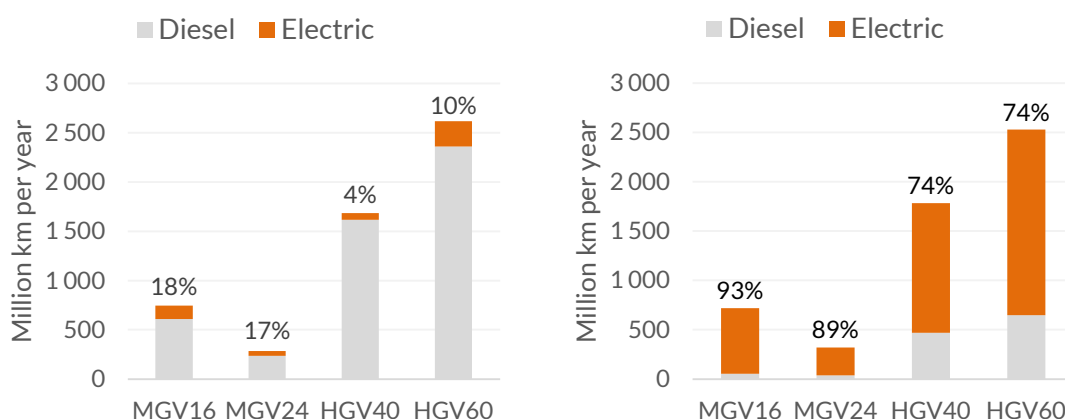
3 Experiment

I detta avsnitt beskrivs experiment utförda för att besvara forskningsfrågorna i avsnitt 1.2.

3.1 Samhällsekonomiskt värde av elektrifiering av tunga lastbilar

Forskningsfråga: Hur värdeskapande är elektrifiering av tunga lastbilar ur ett samhällsekonomiskt perspektiv och hur förändras konkurrensläget mellan dieseldrivna och batterielektriska lastbilar över tid?

I juni 2021 fanns ett trettiotal tunga elektriska lastbilar i Sverige, av totalt ca 80 000 (Power Circle, 2021). Om studiens modell och parameterantaganden är korrekta bör en simulering för modellår 2020 alltså visa att konkurrensläget för dieseldrift är betydligt bättre än för batteridrift. Detta verifierades genom beräkning av ett scenario där möjlighet att installera laddinfrastruktur erbjöds vid och endast vid depån för 25 % av rutterna i trafikdatasetet, vilket motsvarar ett antagande om att 75 % av dagens lastbilsdepåer inte ligger på platser med goda förutsättningar att ansluta laddinfrastruktur till elnätet. Simuleringen indikerade att elektrifiering är det mest kostnadseffektiva alternativet för 10 % av trafikarbetet och 9 % av transportarbetet⁶ i detta scenario (uppdelat per fordonskategori i Figur 6), eller omvänt, att dieseldrift antingen var det enda eller mest kostnadseffektiva alternativet för nio av tio rutter i datasetet.



Figur 6. Elektrifierad andel av trafikarbetet från tunga lastbilar modellår 2020. I vänster figur erbjuds laddning vid depån och endast vid depån för 25 % av rutterna i simuleringsverktyget. I höger figur erbjuds 3000 km elväg plus statistisk laddning vid alla depåer, destinationer och utpekade rastplatser.

Eftersom en enskild lastbil vanligtvis används för fler än en rutt och beslutet att installera depåladdare sannolikt får vänta tills flera bilar vid samma depå kan nyttja laddaren är det rimligt att anta att mycket få åkare känner sig trygga att investera i batterielektriska lastbilar med dessa förutsättningar. Tröghetseffekter av den här typen hanteras inte i modellen, vilket förklarar att modellen gör en liten överskattning av batterifordonens attraktivitet jämfört med den verkliga sammansättningen av lastbilsflottan år 2020.

När är då tiden mogen för elektrifiering av den tunga lastbilstrafiken? Figur 6 visar även utfallet av simuleringen då alla typer av laddinfrastruktur erbjuds på nästan alla platser. I detta hypotetiska scenario har 78 % av trafikarbetet elektrifierats redan modellår 2020. Detta resultat indikerar att dagens tekniska lösningar redan är så bra att det inte finns någon anledning att vänta längre med en storskalig elektrifiering av tunga vägtransporter, och att elektrifieringen bör kunna ske på marknadsmässiga villkor.

Vi vänder åter blicken mot simuleringsmodellen som beskrevs i föregående avsnitt för att bättre förstå dess beteende. Vad har störst påverkan på de totala transportkostnaderna i systemet? Med hjälp av simuleringsverktyget konstruerades en uppsättning scenarier, bestående av alla kombinationer av laddinfrastruktur i Tabell 1. Totalt resulterade detta i 513 scenarier, vilka beräknades för modellår 2035 med ett

⁶ Trafikarbete indikerar körd sträcka och mäts i enheten kilometer, medan transportarbete även tar hänsyn till vikt och mäts i tonkilometer.

slumpvist urval av 3 % av transportrutterna. Samma sampel användes för alla scenarier. Antalet fordonspassager längs varje rutt multiplicerades med inversen till samplingsfrekvensen för att kompensera för nedsamplingen och bibehålla totalt trafik- och transportarbete i systemet. Detta dataset benämns **scenariomatriisen** och ligger till grund för flera experiment och figurer i efterföljande avsnitt.

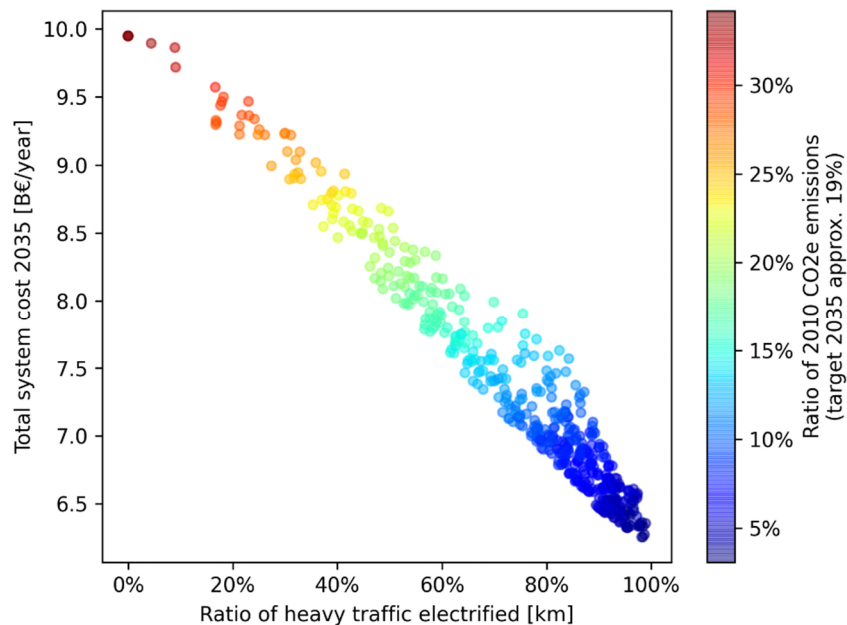
Med nordisk elproduktion innebär elektrifiering alltid en minskning av växthusgasutsläpp från tunga lastbilar, även inräknat utsläpp från batteriproduktion. Det vore önskvärt om elektrifiering samtidigt leder till en minskning av den totala kostnaden att driva transportsystemet, eftersom marknadskrafter då bör driva utvecklingen i denna riktning. Figur 7 visar att den totala systemkostnaden sjunker linjärt med andelen elektrifierat trafikarbete (Pearsons korrelationskoefficient = 0,99), vilket är positivt. Något överraskande är kanske att inga scenarier resulterade i både låg systemkostnad och låg elektrifieringsgrad, och heller inte hög systemkostnad och hög elektrifieringsgrad. Elektrifiering till hög kostnad skulle i verkligheten kunna uppnås genom investering i betydligt mer laddinfrastruktur än vad som krävs för att ladda fordonen, att installera laddinfrastruktur på platser som medför lägre nyttjandegrad än antaget, eller genom att installera onödigt stora batteripack i fordon. Detta förhindras i simuleringsmodellen genom självreglering (se föregående avsnitt), så att endast laddinfrastruktur som bidrar till att minimera transportkostnaden längs minst en rutt och har tillräckligt nyttjande etableras, samt att batterikapaciteter i fordon dimensioneras för att driftskostnaden ska minimeras.

Att merparten sampel ligger nedåt till höger i figuren innebär endast att få scenarier beräknats i vilka investeringarna i laddinfrastruktur är långt under vad som krävs för att elektrifiera transporterna.

Ur Figur 7 framgår att en fullständig elektrifiering av de tunga godstransporterna i Sverige enligt modellens parameterantaganden för år 2035 skulle leda till en minskning av systemets totala kostnader med ca 35%, från ca 10 till 6,5 miljarder euro per år. Figur 8 ger en känsla för hur stor den sammanlagda effekten är av skillnader i parameterantaganden för olika modellår. Utöver systemkostnad och grad av transportelektrifiering visar Figur 7 hur de totala utsläppen av CO₂ fördelas för de olika scenarierna. Sverige har antagit mål om utsläppsreduktioner av växthusgaser från vägtransporter med 70 % till 2030 och 100 % till 2050. Färgen ger därmed en indikation om vilken nivå av elektrifiering som bör ha uppnåtts vid olika årtal. Notera att beräkningen gjorts under antagande om att andelen förnybara råvaror i dieseln fortsätter öka. Utan detta bidrag till utsläppsminskningarna behöver elektrifieringen gå snabbare än figuren indikerar för att utsläppsmålen ska uppfyllas.

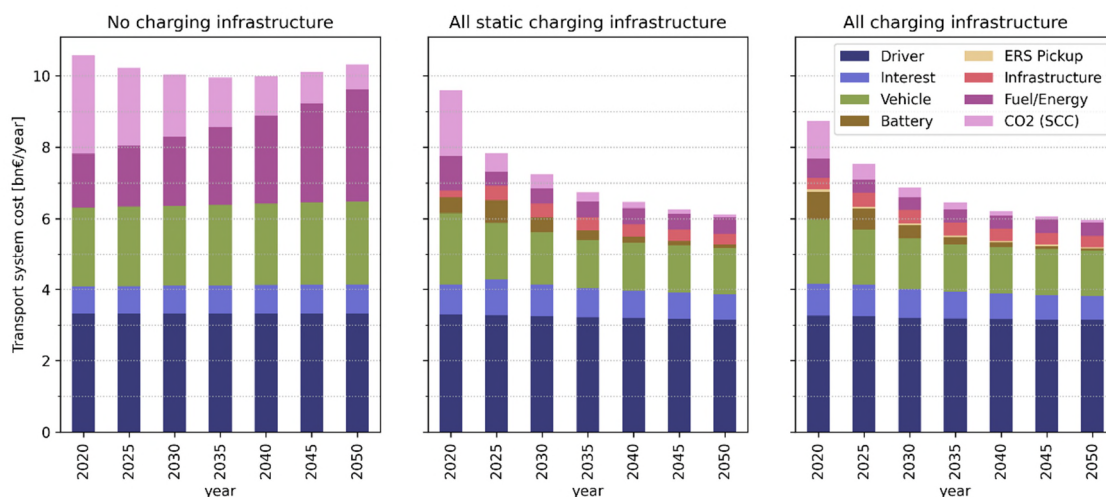
Tabell 1. Konfigurationer av laddinfrastruktur i scenariomatrisen, totalt $2 \cdot 3^5 + 3^3 = 513$ scenarier. Andel depå respektive destinationsladdning avser andel av transportrutter som erbjuds möjlighet att ladda vid dessa platser. Andel stationsladdning avser andel av de utpekade lämpliga platserna för etablering av publika snabbbladdarstationer.

Depå	Destination	Station	Elväg		
			Vägnät	Elektrifierad andel	Maxeffekt per fordon
0 %	0 %	0 %	0 km	25 %	100 kW
25 %	25 %	25 %	2 000 km	50 %	300 kW
75 %	75 %	75 %	6 000 km	100 %	700 kW



Figur 7. Total kostnad för att driva transportsystemet sjunker linjärt med andelen elektrifierat trafikarbete. Elektrifieringen möjliggörs i sin tur av investeringar i laddinfrastruktur, vilka är inkluderade i systemkostnaden. Färg indikerar total utsläppsminskning i CO₂-ekvivalenter i förhållande till 2010 års nivå. Från denna referensnivå har Sverige antagit mål om utsläppsreduktion med 70 % till år 2030 och 100 % till 2045. Scenariomatrisen har beräknats med parametervärden för år 2035, men grovt räknat ger figuren en indikation om att ca 20 % av trafikarbetet behöver utföras med elfordon år 2030, 60 % år 2035, 80 % år 2040 och 100 % år 2045, för att utsläppsmålen ska uppnås. Eftersom elektrifiering medför en betydande minskning av transportkostnaden är det rimligt att anta att trafikarbetet kommer att öka över perioden, vilket innebär att elektrifieringen behöver överstiga dessa nivåer för måluppfyllelse. Sänks reduktionsplikten ökar kravet på elektrifiering ytterligare.

Figur 8 visar hur den totala systemkostnaden är uppdelad i kostnadskomponenter, samt hur kostnadsutvecklingen ser ut om ingen laddinfrastruktur byggs, respektive om laddinfrastruktur erbjuds för alla rutter och på nästan alla platser under hela simuleringsperioden, utan och med elvägar. Inget av dessa extremscenarion bedöms representera en möjlig framtid. Figuren syftar till att visa de högsta respektive lägsta systemkostnader som kan uppnås i modellen med de parameterantaganden som gjorts, samt inom vilka kostnadsområden eldrift kan bidra med besparingar (utsläpp, bränsle och fordon). Figuren visar även att modellen inte är byggd så att dynamisk laddning via elvägar är det enda sättet att uppnå kostnadsminimering i systemet.



Figur 8. Total systemkostnad uppdelad på ingående beräknade kostnadskomponenter, för tre extremscenarier: helt utan elektrifiering, med full tillgång till statisk laddinfrastruktur, samt med full tillgång till både statisk och dynamisk laddinfrastruktur. Dessa tre scenarier visar de maximala och minimala kostnader som kan uppnås för mer realistiska utvärderade scenarier. Figuren visar även att elvägar (dynamisk laddinfrastruktur) inte är det enda sättet att uppnå kostnadsminimering i modellen, samt att elektrifiering av tunga lastbilar är kostnadsbesparande redan modellår 2020, vid tillräcklig tillgång till laddinfrastruktur. Alla skatter har exkluderats ur beräkningen av total systemkostnad. Dieselskostnaderna ökar över tid på grund av ett antagande om ökad inblandning av biodrivmedel, vilket också minskar växthusgasutsläppen. CO₂-utsläpp vid full elektrifiering uppstår vid batteriproduktion. Batterikostnaderna minskar över tid främst på grund av förbättrad batteriteknik.

Kostnaderna för andra, mer realistiska, scenarier kan bedömas relativt till dessa maximala och minimala systemkostnader. Sju sådana scenarier med olika utbyggnadstakt och med och utan elväg presenteras i Tabell 2, Figur 9 och Figur 10.

Generellt gäller att större och tidigare investeringar i laddinfrastruktur ger större och snabbare kostnadssänkningar för transportsystemet som helhet, samt att investering i elväg medför att investeringstakten i annan laddinfrastruktur kan sänkas med bibehållen elektrifieringstakt. Notera att systemet är självreglerande i simuleringsmodellen: en förändrad investering i en typ av laddinfrastruktur leder till förändrad efterfrågan på annan laddinfrastruktur. Denna självreglering leder både till att installerad effekt per plats anpassas, och till att ingen laddinfrastruktur alls byggs på platser där den resulterande efterfrågan på laddning är mycket låg. Är självkostnaden för laddning väldigt olika på olika platser påverkar det efterfrågan på att ladda där, vilket i sin tur leder till anpassning av infrastrukturen genom återkoppling. Självreglering leder exempelvis till att investering i snabbbladdarstationer vid rastplatser är mycket olika i scenarierna "average, static" och "very fast", trots att den typen av infrastruktur erbjuds vid samma platser i båda scenarierna.

Eftersom infrastrukturen byggs ut över tid och parametervärden ändras över tid ändras även konkurrensläget mellan olika typer av laddinfrastruktur över tid. I scenariot *very fast* byggs elväg till slut på ett så stort vägnät att brukarkostnaden blir för hög i förhållande till alternativa laddmöjligheter, vilket leder till att användningen av elvägsinfrastrukturen minskar kraftigt modellår 2040. I detta scenario ökar i stället laddningen vid snabbbladdarstationer samma år. Denna typ av brytpunkt är oönskvärd och representerar en mycket stor kapitalförstörelse. I Figur 10 visas endast den

beräknade brukarkostnaden för varje typ av laddinfrastruktur. Valet av laddmetod i simuleringen påverkas även av andra kostnader, vilka utforskas i avsnitt 3.7.

Kumulativa CO₂-utsläpp i Figur 9 uppgår till 34–60 Mton för perioden 2020–2050. Detta kan jämföras med att scenariot med 100% dieseldrift ovan resulterar i kumulativa CO₂-utsläpp på ca 80 Mton för samma tidsperiod. Merparten av utsläppen i de mest aggressiva scenarierna sker under perioden 2020–2024, innan utbyggnaden av laddinfrastruktur tar fart. Inkluderade CO₂-källor är förbränning av fossil diesel och biodiesel, elproduktion samt batteritillverkning.

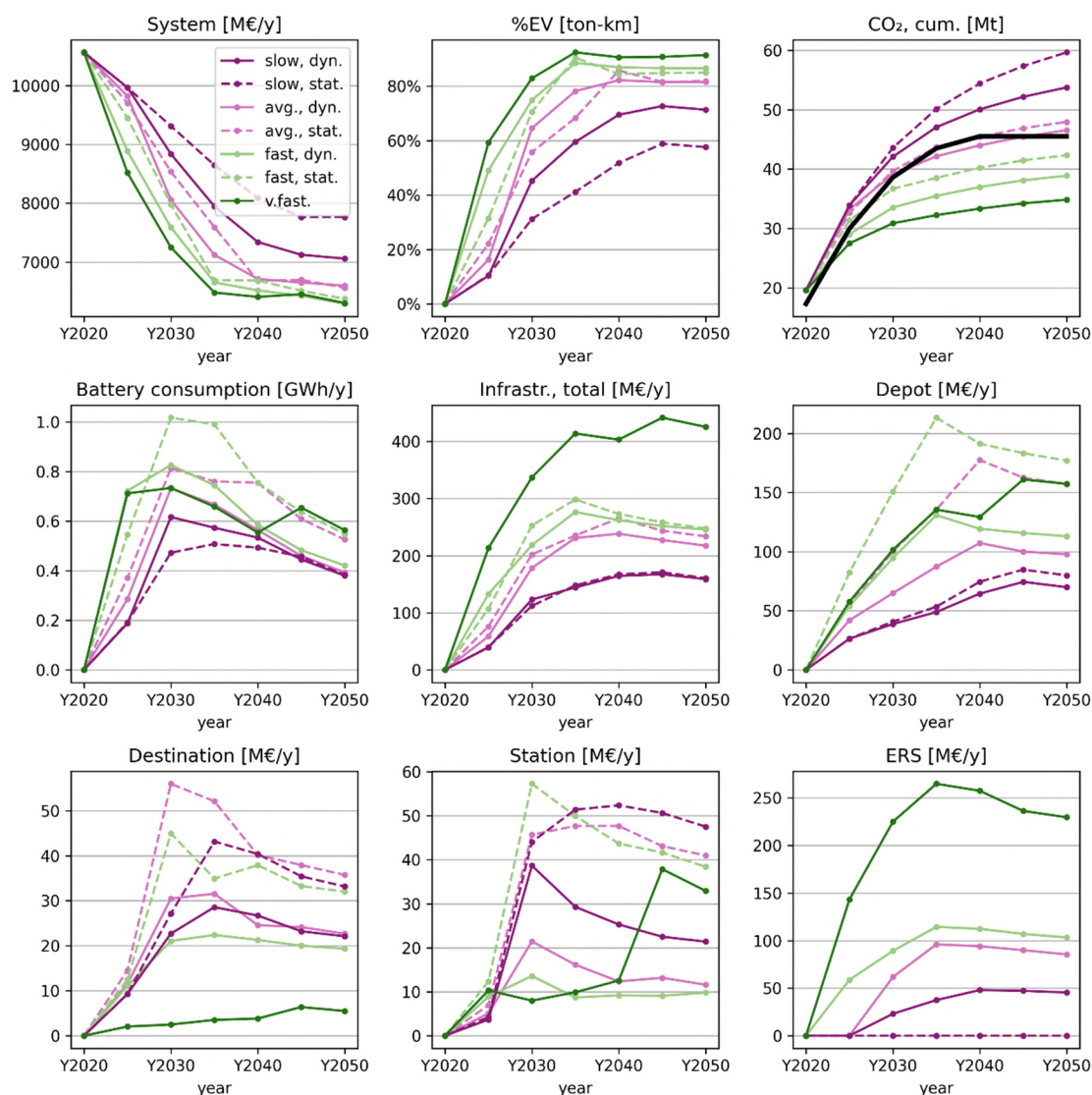
Total årlig förbrukning av batterikapacitet⁷ beror av både andel elektrifierad trafik och förbrukningstakten per fordon. Här bör noteras att de scenarier som leder till snabbast elektrifiering inte är de som leder till högst årlig förbrukning av tillverkade fordonsbatterier. Elvägar minskar kraftigt batterislitaget längs utbyggda sträckor, vilket diskuteras vidare i avsnitt 3.7.

Figur 10 illustrerar hur viktigt det är att ta hänsyn till interaktionseffekter mellan olika typer av laddinfrastruktur, exempelvis i lönsamhetsberäkningar för olika former av laddinfrastruktur. Notera att samma parameterantaganden använts i alla scenarier och att skillnader i infrastrukturkostnad per energienhet uppstår genom variationer i nyttjandegrad, vilka följer av konkurrensläget och synergierna mellan de olika typerna av laddinfrastruktur. I Figur 10 framträder ändå en tydlig trend att andelen av den totala elektriska energin som levereras via depåladdning ökar över tid, medan andelen från övriga typer av laddinfrastruktur minskar något.

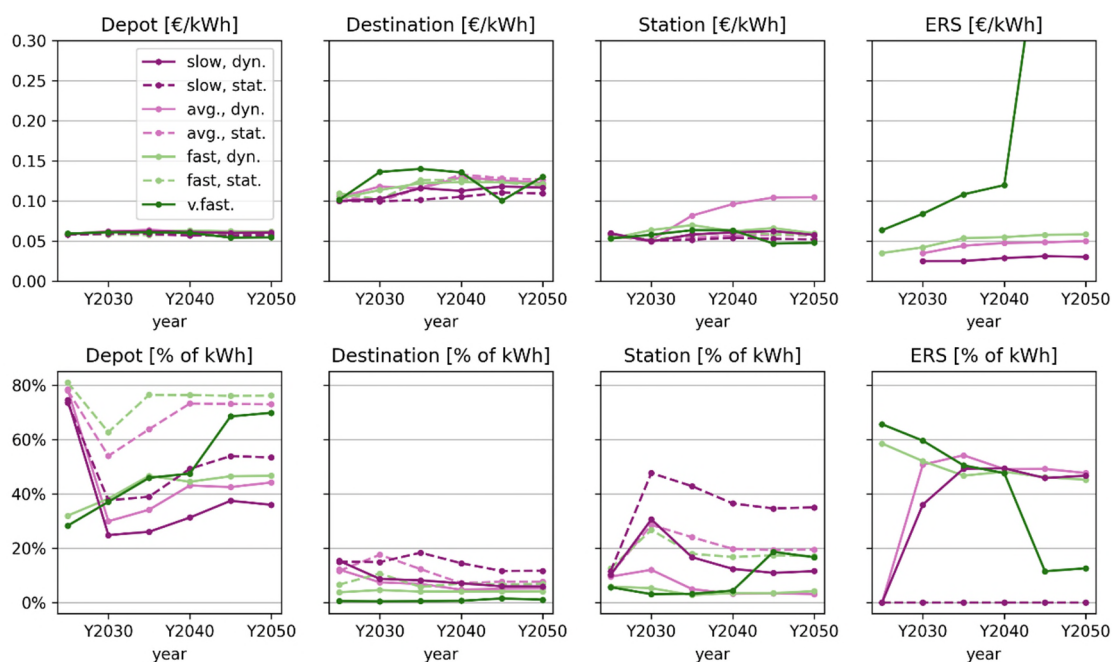
Tabell 2. Erbjuden laddinfrastruktur i sju realistiska scenarier. Start- och slutår anger simuleringsperioden då respektive typ av laddinfrastruktur byggs ut, linjärt ökande över perioden. Procentandelar är andel av rutter som har tillgång till depå- och destinationsladdning (slumpvis valda), andel av utpekade lämpliga platser för snabbaddarstationer (i sjunkande ÅDT-ordning), samt andel av angivet vägnät som elektrifieras. ERS-effekt är toppeffekt per fordon. Antagna maximala laddeffekter per fordon vid depå, destination och station är 100, 500 respektive 750 kW.

	Depå			Destination			Station			ERS				
	Startår	Slutår	% rutter	Startår	Slutår	% rutter	Startår	Slutår	% platser	Startår	Slutår	km vägnät	% elväg av väg	max kW per fordon
• slow, dynamic	2025	2045	40 %	2025	2040	15 %	2025	2040	50 %	2030	2040	2 000	20 %	700
• slow, static	2025	2045	50 %	2025	2040	15 %	2025	2045	100 %	-	-	-	-	-
• average, dynamic	2025	2040	70 %	2025	2035	20 %	2025	2030	30 %	2030	2035	3 000	50 %	300
• average, static	2025	2040	90 %	2025	2035	25 %	2025	2040	80 %	-	-	-	-	-
• fast, dynamic	2025	2035	80 %	2025	2035	20 %	2025	2040	50 %	2025	2035	4 000	50 %	300
• fast, static	2025	2035	100 %	2025	2035	25 %	2025	2035	100 %	-	-	-	-	-
• very fast	2025	2035	90 %	2025	2035	5 %	2025	2040	80 %	2025	2035	8 000	75 %	300

⁷ Batterier åldras både av att kalendertid passerar och genom laddning och urladdning, vilket bland annat leder till att batteripack förlorar lagringskapacitet över tid. Denna förbrukningstakt har summerats för alla fordonsbatterier i systemet och rapporteras i enheten GWh/år, för att möjliggöra jämförelser med andra prognoser för total tillverkningskapacitet från batterifabriker.



Figur 9. Jämförelse av totala kostnader och grad av transportelektrifiering för sju realistiska scenarier. Ovan från vänster: total årlig systemkostnad; andel av totala ton-km som sker med eldrift; total årlig kostnad för bränsle och energi; totalt årligt batterislitage; kumulativa CO₂-utsläpp; total årlig kostnad för laddinfrastruktur inkl. nätavgifter; total årlig kostnad för depåladdare; total årlig kostnad för destinationsladdare; total årlig kostnad för snabbbladdarstationer; total årlig kostnad för elväg. Den svarta linjen motsvarar Sveriges antagna utsläppsreduktionsmål för vägtrafiken, där endast scenarierna ritade i gröna nyanser leder till måluppfyllelse i form av kumulativa utsläpp. Notera dock att utsläppsmålet för 2045 är satt till nollutsläpp för transportsektorn, vilket inget av scenarierna uppfyller.



Figur 10. Jämförelse av infrastrukturkostnad per kWh, exklusive el och skatter (övre rad), samt andel av total elförsäljning (nedre rad), i scenarierna från Tabell 2. Kostnad per kWh är beräknad som total kostnad per år för all infrastruktur av respektive typ, dividerad på total energi levererad från samma typ. Energikostnaden är lägre vid depå än vid övriga typer, på grund av en större andel nattladdning.

3.2 Robusthetsanalys av framtida batterikostnad

Vid tidpunkten då denna studie genomförs är den gängse uppfattningen att batterikostnader utgör en betydande del av totalkostnaden för en elektrisk lastbil. Det innebär dock inte per automatik att fordonsbatterier även i framtiden kommer att vara en kostnadsdrivande komponent, exempelvis på grund av att tillverkningskostnaden för batterier fortsätter sjunka på det sätt som skett historiskt, eller att batteritekniken utvecklas så att batteripacken inte åldras lika snabbt. I Figur 8 syns hur batterikostnaden minskar kraftigt över tid med de grundantaganden som gjorts för simuleringsmodellen. Detta avsnitt visar att den förväntade kostnadsminskningen inte är avhängig en minskad produktionskostnad för batteripack.

Den totala kostnaden per km för ett batteripack kan uttryckas som summan av 1) den utjämnade inköpskostnaden för själva batteriet minus 2) residualvärdet när det tas ur bruk, 3) den utjämnade räntekostnaden, 4) det utjämnade värdet av växthusgasutsläpp från batteriproduktion, 5) alternativkostnaden för den vikt och volym som istället hade kunnat användas för godstransporter, samt 6) alternativkostnaden för den extra stilleståndstid som krävs för att ladda batteriet, utöver raster och stopp som motiveras av transporter och förraster. Ett stort batteripack kostar mycket i inköp och medför höga kapitalkostnader, samt minskar lastkapaciteten, men håller länge, kan lagra energi för långa arbetspass och långa körsträckor, samt kan ta emot stora mängder energi under korta stopp. För stora batteripack dominerar kalenderåldring, medan cykelåldring dominerar för små batteripack.

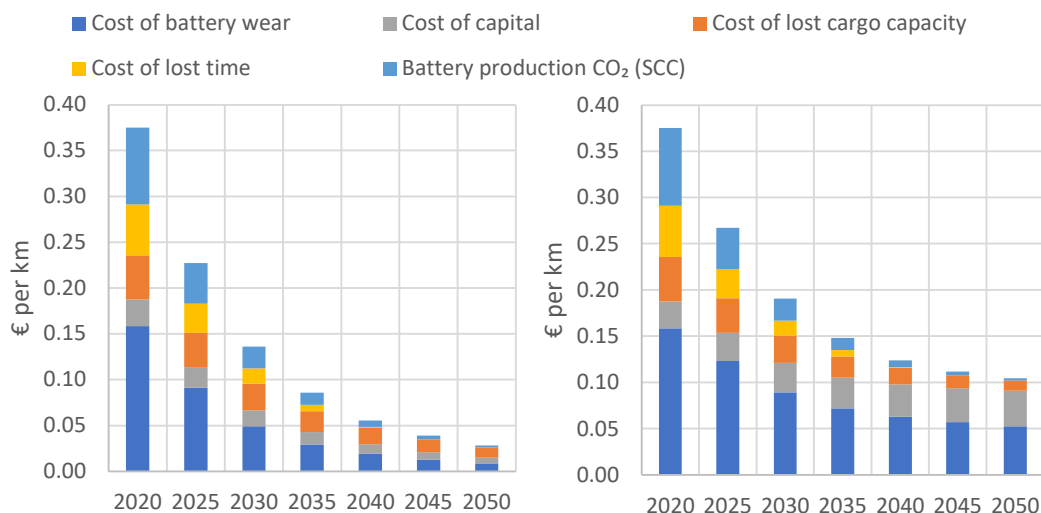
För olika kalenderår gäller olika inköpskostnad, återvinningsvärde, energidensitet, SoC-fönster, c-rate, livslängd i cykler och kalenderår, samt utsläppsnivåer från tillverkning,

enligt parameterantaganden i avsnitt 8. Om ett batteripack dimensioneras för en given räckvidd behöver en kostnadsberäkning även ta hänsyn till utvecklingen av fordons energiförbrukning per körd sträcka. I takt med att laddinfrastrukturen blir alltmer utbyggd ökar också sannolikheten att fordonsladdning erbjuds vid ett naturligt stopp. Tillgång till dynamisk laddning (elväg) medför att en del av energin fordonet förbrukar överförs direkt från laddinfrastruktur till elmotor, utan att bidra till cykelåldring av batteriet.

Utvecklingen av alla dessa parametrar samverkar för att skapa en mycket kraftig minskning av de totala batterirelaterade kostnaderna över tid (Figur 11), eftersom flertalet parametrar interagerar multiplikativt. Tidsförlusten har här beräknats under antagande om att ett fordon startar varje dag med ett fullt batteripack, att alla dagar har samma körsträcka, att sannolikheten att kunna ladda vid naturliga stopp ökar över tid (initialt 20 %), och att övrig energi behöver tillföras vid ytterligare stopp. Värdet av lastvikt beräknas som ett schablonvärde gånger batteriets vikt och volym, beroende på vilken som medför högst kostnad (nästan alltid vikt).

Grundantagandet kring batteripriser som gjorts för beräkningarna är ett packpris på €160/kWh år 2020, med en årlig prisminskning på 3 %. Med detta antagande blir kostnaden obetydlig för själva batteriet senare modellår, när batteripacket kostar lite i inköp och håller längre än den övriga lastbilen. Om vi i stället antar en årlig prisökning med 3 % leder teknikförbättringen fortfarande till ungefär en halvering från dagens utjämnade direkta batterikostnader. Medräknat övriga indirekta kostnader sker en 70-procentig minskning per fordonskilometer över tid, även när inköpspriset på batterier ökar över tid. Tabell 3 visar hur summan (total stapelhöjd i Figur 11) utvecklas för olika antaganden om batterikapacitet i HGV40-lastbilar.

Läsare som önskar tillgång till den exakta beräkning som ligger bakom skattningen av utvecklingen av batterikostnader över tid ombeds kontakta författaren.



Figur 11. Ungefärlig utjämnad batterikostnad per år, per kostnadskomponent, för fordonsklassen HGV40 med ett batteripack som ger 400 km räckvidd. I diagrammet till vänster antas en årlig prisminskning på batterikapacitet på 3 %, och i diagrammet till höger antas en årlig prisökning på 3 %. I simuleringsmodellen som används för efterföljande experiment beräknas åldringstakten för batterier även med hänsyn till laddning vid olika effekter längd olika rutter.

Tabell 3. Total batterikostnad i eurocent per km, som funktion av modellår och önskad räckvidd, för fordonsklassen HGV40, under antagande om 3 % årlig prisminskning på batteripack (vänster) samt 3 % årlig prisökning (höger).

		2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050			2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Minimum usable range [km]	100	47	34	27	24	22	20	18	Minimum usable range [km]	100	47	37	31	28	26	23	21
	133	47	34	25	19	15	13	11		133	47	37	29	23	19	17	15
	178	42	28	19	14	11	9	7		178	42	31	23	18	15	13	11
	237	38	24	16	11	8	6	4		237	38	28	20	15	13	11	10
	316	37	23	14	9	6	4	3		316	37	26	19	15	12	10	9
	422	38	23	14	9	6	4	3		422	38	27	19	15	13	12	11
	562	41	24	15	10	7	5	4		562	41	29	21	18	16	15	14
	750	45	27	18	13	9	7	5		750	45	33	26	22	20	19	18
Minimum usable range [km]	1000	53	33	22	16	12	9	6	Minimum usable range [km]	1000	53	39	32	28	25	24	23
	1334	63	41	28	20	15	11	8		1334	63	48	40	35	33	31	30

3.3 Effekter av att variera storleken på elvägnätet

Forskningsfråga: Kan utbyggnad av elväg vara värdeskapande ur ett samhällsekonomiskt perspektiv jämfört med elektrifiering utan elväg? Vilken längd, placering, utbyggnadstakt, effekt och täthet är i så fall mest värdeskapande? (se även 3.4)

Forskningsfråga: Hur förändras nyttan av en utbyggd elväg över dess tekniska livstid, på grund av exempelvis förbättrad batteriteknik?

Det är svårt att argumentera för att en elväg bör byggas om den inte skapar kostnadssänkningar i andra delar av transportsystemet till ett större värde än investeringskostnaden för själva elvägen. Hur systemkostnaden påverkas beror i simuleringsmodellen av elvägens konfiguration (längd, täthet, effekt), vilken tidsperiod som utvärderas, samt vilken annan laddinfrastruktur som redan finns på plats och kan tillföras under eller efter utbyggnadsperioden. I analysen i detta avsnitt definieras elvägens marginalvärde som den minskning av systemets totala årliga utjämnade kostnad (inklusive kostnaden för elvägen) som ett elvägsbygge medför, givet oförändrade antaganden om tillgänglighet till annan laddinfrastruktur. Notera som tidigare att systemet är självreglerande: ökad möjlighet att välja att ladda vid en typ av laddinfrastruktur leder med oförändrade antaganden om tillgänglighet till förändrade investeringar i annan laddinfrastruktur, på grund av både synergistiska och konkurrerande effekter. Se avsnitt 2.3 för en mer utförlig beskrivning av logiken för självreglering.

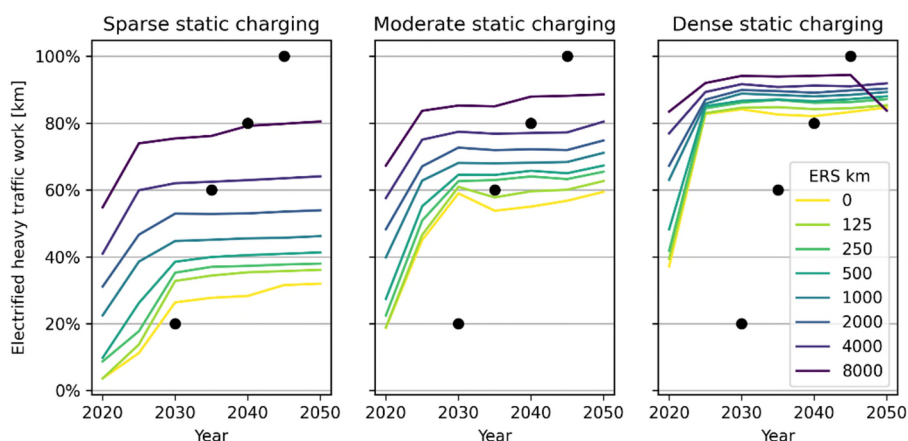
I Figur 13 har en elvägs marginalvärde beräknats för olika längd, år och för olika täthet av kompletterande infrastruktur för statisk laddning (gles, medel, tät: se Tabell 4). För det vägnät där elväg byggs antas 35 % elektrifieringsgrad och 500 kW maxeffekt per fordon. Figur 14 visar samma data i absoluta tal och Figur 12 visar graden av transportelektrifiering som infrastrukturen möjliggör.

Från Figur 7 vet vi att systemkostnaden främst styrs av hur stor andel av trafikarbetet som elektrifierats, vilket innebär att ett positivt marginalvärde (minskad systemkostnad) främst uppstår till följd av att elvägen möjliggör en ökad grad av transportelektrifiering. Marginalvärdet av ett elvägnät är större för stora vägnät, men storleken på ökningen av marginalvärdet avtar med ökande längd på det redan byggda elvägnätet och med ökande tillgång till annan laddinfrastruktur, eftersom en ökande grad av elektrifiering redan möjliggjorts av den infrastruktur som redan är på plats. Eftersom kostnadsfördelen för eldrift ökar över tid (se Figur 8) ökar även elvägens marginalvärde över tid.

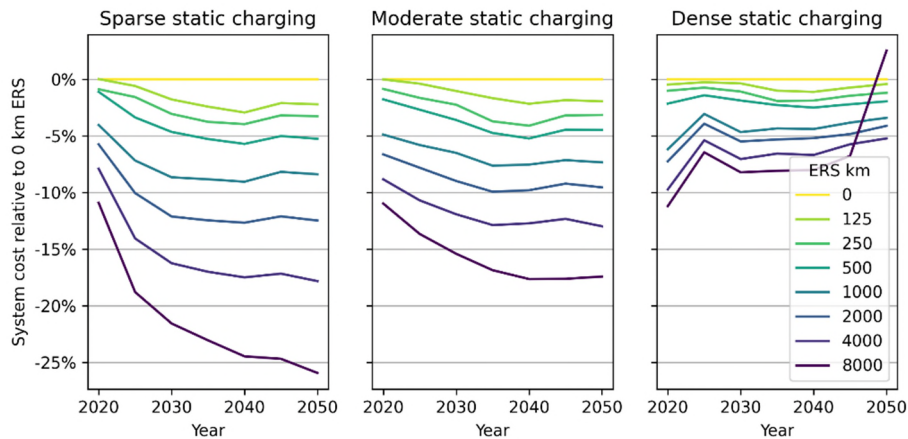
Simuleringen har beräknats för storlekar på det elektrifierade vägnätet från 125 km till 8 000 km, vilka efter optimering resulterar i något mindre vägnät på upp till 6 000 km (varav 35 % elektrifieras). Givet dagens mängd trafik på vägarna är det inte lönsamt att elektrifiera större vägnät än så, eftersom kostnaden per levererad kWh utslagen över hela nätet ökar när vägnätet görs större och vägar med mindre trafik läggs till. I scenariot med 8 000 km vägnät blir brukarkostnaden simuleringsår 2045 och 2050 så hög att laddning via annan laddinfrastruktur blir billigare. Detta resulterar i sin tur i en återkopplingsloop som driver ner användandet och driver upp kostnaden per användare, med konsekvens att elvägen bidrar till att öka i stället för att minska den totala systemkostnaden, jämfört med om ingen elväg byggts alls. Om den tunga trafiken på vägnätet ökar från dagens nivåer till följd av lägre transportkostnader, eller om även personbilstrafik bidrar till kostnadstäckning av infrastrukturen, kan elväg sannolikt byggas på ett ännu större vägnät.

Tabell 4. Nivåer av tillgång till infrastruktur för statisk laddning som använts i beräkningen av en elvägs marginalvärde.

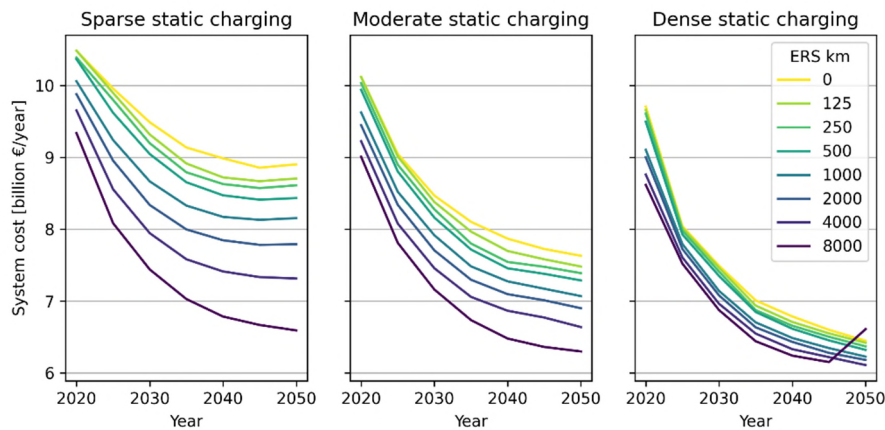
Nivå av tillgång	Depåladdning	Destinationsladdning	Snabbladdarstationer
Gles	10 % av rutter	10 % av rutter	10 % av platser
Medel	50 % av rutter	25 % av rutter	50 % av platser
Tät	90 % av rutter	50 % av rutter	90 % av platser



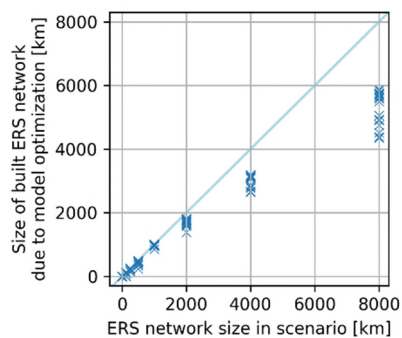
Figur 12. Grad av transportelektrifiering vid tillförsel av elväg av olika längd, för olika år och för olika täthet av kompletterande statisk laddinfrastruktur. Som tidigare noterats innebär Sveriges antagna mål om utsläppsreduktion för vägtrafiken att minst ca 20 % av trafikarbetet behöver utföras med elfordon år 2030, 60 % år 2035, 80 % år 2040 och 100 % år 2045. De svarta punkterna indikerar dessa elektrifieringsnivåer.



Figur 13. Relativ förändring av total årlig systemkostnad vid tillförsel av elväg av olika längd, för olika år och för olika täthet av kompletterande statisk laddinfrastruktur.



Figur 14. Total årlig systemkostnad vid tillförsel av elväg av olika längd, för olika år och för olika täthet av kompletterande statisk laddinfrastruktur. Se Figur 15 och diskussion i text angående längden på de större elvägnäten.



Figur 15. Faktisk storlek på ERS-nätverken i experimentet. Enligt optimeringslogiken plockas elektrifierade vägsnitt bort där kostnaden per lokalt levererad kWh är mer än fem gånger medelkostnaden för hela ERS-nätverket, till följd av mycket lågt lokalt nyttjande.

Figur 12 ger även en indikation om hur omfattande utbyggnaden av infrastruktur för statisk laddinfrastruktur kommer att behöva vara, vid olika nivåer av utbyggnad av elväg. Ska mer än 90 % av den tunga trafiken elektrifieras utan elvägar kommer det krävas en mycket omfattande utbyggnad av infrastruktur för statisk laddning, sannolikt till och med över den mycket ambitiösa nivå som anges i scenariot ”tät” i Tabell 4. Kostnadsfördelarna med eldrift uppstår redan ca 2025 och om laddmöjligheter ska finnas vid nästan alla lastbilsdepåer inom bara några år kommer det sannolikt krävas att

merparten av depåerna omlokaliseras till platser där bättre förutsättningar finns för högt effektuttag från elnätet. Utan elväg krävs utöver depåladdning både möjlighet till snabbbladdning vid i princip alla de platser som pekats ut i tidigare forskning (eller andra likvärdiga platser) och laddning vid en stor andel av destinationer.

En metod för att snabbare nå upp till mycket tät tillgång på laddmöjligheter för alla tunga lastbilar kan kanske vara att samlokalisera infrastruktur för långsamladdning nattetid med snabbbladdning dagtid, så att publik dagladdning inte begränsas till de centraliserade platser (främst större rastplatser) som pekats ut i tidigare forskning. Destinationsladdning är troligtvis svår att få ekonomiskt lönsam vid alla de platser där lastbilar inte lastar eller lossar gods kontinuerligt större delen av dygnet, vilket i antal platser räknat bör vara merparten av destinationer.

Satsar Sverige på elvägar för att minska behovet av utbyggnad av annan laddinfrastruktur krävs i stället ett elektrifierat vägnät som är betydligt mer omfattande än det som hittills diskuterats på politisk nivå i landet (2000 km till 2030, 3000 km till 2035) om målet är elektrifiering av >90 % av det tunga trafikarbetet. Simuleringsresultaten pekar på att ca 4 000 km vägnät är ett bättre mål ur ett samhällsekonomiskt perspektiv.

I detta experiment har infrastrukturen hållits i princip konstant över tid. Beräkningen kan i stället utföras så att infrastruktur för statisk laddning byggs ut först och elväg tillförs därefter. Konsekvensen av en sådan utbyggnad diskuteras i avsnitt 3.6.

3.4 Effekter av att variera elvägnätets elektrifieringsgrad och effekt

Forskningsfråga: Kan utbyggnad av elväg vara värdeskapande ur ett samhällsekonomiskt perspektiv jämfört med elektrifiering utan elväg? Vilken längd, placering, utbyggnadstakt, effekt och täthet är i så fall mest värdeskapande? (se även 3.3)

Elvägens längd undersöktes i föregående avsnitt, men dess nytta och kostnad påverkas även kraftigt av installerad effekt per brukarfordon och hur tätt elvägsinfrastruktur installeras på det utpekade vägnätet (vägnätets elektrifieringsgrad). Exempelvis kan en elvägsteknik som tillåter överföring av högre effekt per fordon leda till en totalt lägre infrastrukturkostnad med bibehållen medeleffekt om infrastrukturen installeras i intervall med omväxlande elektrifierad och oelektrifierad väg.

Dessa parametrar har dock en icke trivial påverkan som varierar mellan fordon i olika viktklasser och mellan fordon som är anpassade för olika rutter. Fordon som kör långa rutter längs en elväg kan inte konsumera mycket energi i snitt än den effekt som krävs för drift av fordonet, eftersom batteriet snart blir fulladdat (lastbilssekipage på 60 ton drar i snitt 100–150 kW vid körning på plan motorväg), medan rutter som endast kortare delsträckor överlappar med ett elvägnät kan efterfråga effekt motsvarande snabbbladdning (>500 kW) längs den nyttjade elvägssträckan för att snabbt öka

energinivån i sitt batteri från en initialt låg nivå. Batteripack som redan är fulladdade⁸ kan endast ta energi för framdrift från elvägen. Storleken på det batteripack som sitter i ett fordon begränsar hur hög effekt som kan tas emot för laddning av batteriet och en högre laddeffekt relativt batterikapaciteten (c-rate) sliter mer på batteripacket och kräver en dyrare strömavtagare, samtidigt som större batteri och högre laddeffekt generellt leder till längre räckvidd utanför elvägen. Olika stora batteripack lämpar sig för olika ruttor och olika fordonsviktklasser och ett fordons viktklass avgör hur mycket energi som går till direkt framdrift av fordonet. Dessa interagerande och begränsande faktorer gör att en given elvägskonfiguration med en viss elektrifieringsgrad och maxeffekt per fordon inte ger samma medeleffekt för alla fordon som trafikerar vägen. Simuleringsmodellen som används i denna studie kan hantera denna komplexitet.

För att förstå hur dessa parametrar påverkar systemkostnaden grupperades scenarierna i scenariomatrisen efter nivå av tillgång till infrastruktur för statisk laddning ($3 \cdot 3 \cdot 3 = 27$ grupper). Inom varje grupp rangordnades de 19 utvärderade elvägskonfigurationerna från lägst till högst systemkostnad. Genom att undersöka hur stabil denna rangordning är kan vi avgöra hur starkt beroende elvägens optimala utformning är av tillgången på annan laddinfrastruktur av olika typer. Tabell 5 visar hur medelvärdet, 10-percentilen och 90-percentilen för rangordningen samt medelvärdet för total systemkostnad varierar för de olika utvärderade elvägskonfigurationerna.

Rangordningen är mycket stabil och de fyra bäst rankade alternativen består alla av ett mycket stort elektrifierat vägnät med en medeleffekt på 150–350 kW (det exakta intervallet begränsas av vilka scenarier som utvärderats). Dessa fyra alternativ resulterar alla i samma systemkostnad. Detta är ett mycket positivt resultat: ett elvägnät kan utformas utan kännedom om hur tillgången på infrastruktur för statisk fordonsladdning kommer att se ut i framtiden. För alla utvärderade kombinationer av tillgång till annan laddinfrastruktur ger alternativet helt utan elväg den högsta systemkostnaden. Utöver dessa resultat bör utformningen av en elväg ta hänsyn till resultaten från nästföljande avsnitt om påverkan på fordonsbatterier.

Energikonsumtionen för de fyra lastbilsviktklasserna i modellen motsvarar en medeleffekt på ca 40–125 kW vid motorvägshastighet. Fordonens batterier är konfigurerade för att minst kunna ta emot en effekt på 100–500 kW, utöver energikonsumtionen för framdrift av fordonet. Större batteripack motiverade av behov av längre räckvidd möjliggör högre laddeffekter, medan ökad tillgång till laddinfrastruktur främst vid depå gör att fordonen kan anlända till elvägen med högre energinivå i batteripacket.

⁸ Viss marginal bör i praktiken reserveras för regenerativ inbromsning och vissa batterikemier utsätts för ökad kalenderåldring när energinivån är stabilt hög över längre tid. Ingen av dessa effekter har ansetts nödvändig att modellera explicit. Regenerativ inbromsning ingår i snittenergiförbrukningen.

Tabell 5. Rankning av elvägsconfigurationer enligt scenariomatrisen. Röd markering indikerar konfigurationer som alla resulterar i samma systemkostnad och som alltid utgör de fem bästa alternativen. Rankningen av vilken elvägsconfiguration som ger lägst systemkostnad är alltså mycket robust med avseende på kombinationer av tillgång på annan laddinfrastruktur, vilket innebär att offentliga beslut om elvägsutbyggnad kan tas utan kännedom om privata laddinfrastrukturoperatörers framtida initiativ.

ERS config. rank	Sample size	Road ntwrk km	ERS infra. km (mean)	kW per vehicle	ERS density	Mean kW	Within-group rank			System bn€/y (mean)
							Mean	10th perc.	90th perc.	
1	27	6 000	2 027	700	50%	350	1.5	1	2.4	6.7
2	27	6 000	1 079	700	25%	175	3.3	2	4	6.8
3	27	6 000	3 822	700	100%	700	3.5	1	5	6.7
4	27	6 000	4 072	300	100%	300	3.5	2	5	6.7
5	27	6 000	2 077	300	50%	150	3.8	1.6	5	6.8
6	27	2 000	1 601	700	100%	700	7.1	6	9.4	7.1
7	27	2 000	1 622	300	100%	300	7.1	6	8	7.1
8	27	2 000	815	700	50%	350	7.7	7	9	7.1
9	27	2 000	815	300	50%	150	10.1	9	11	7.3
10	27	2 000	433	700	25%	175	10.3	9	12	7.3
11	27	6 000	914	300	25%	75	10.6	7.2	12	7.4
12	27	6 000	3 062	100	100%	100	11.0	6.6	19	7.3
13	27	2 000	373	300	25%	75	13.5	12	14	7.7
14	27	2 000	1 188	100	100%	100	13.7	13	17	7.6
15	27	2 000	577	100	50%	50	15.7	14.6	16	7.9
16	27	6 000	1 502	100	50%	50	15.7	15	18	7.8
17	27	6 000	594	100	25%	25	16.7	14	19	8.0
18	27	2 000	281	100	25%	25	17.4	15	18	8.0
19	27	0	0	0	25%	0	17.7	14.2	19	8.1

3.5 Avkastning på investeringar i laddinfrastruktur

Forskningsfråga: Vilken typ av laddinfrastruktur är den mest kostnadseffektiva metoden att elektrifiera den tunga lastbilstrafiken?

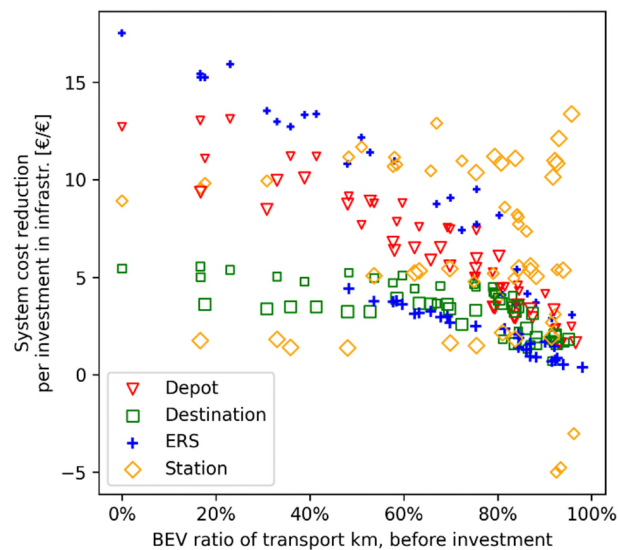
Scenariomatrisen möjliggör parvisa jämförelser av systemets beteende med och utan olika typer av laddinfrastruktur, i syfte att beräkna avkastning på systemnivå på investeringar i laddinfrastruktur vid olika tillstånd i systemet.

För beräkningen av Figur 16 har 81 scenarier valts ut ur scenariomatrisen som antingen inte innehåller elväg eller som innehåller elväg med effekt 700 kW och täckningsgrad 50 % (den högst rankade konfigurationen enligt Tabell 5). Scenarier helt utan en typ av laddinfrastruktur (nivå 0 i Tabell 1) har parats ihop med det i övrigt identiska scenariot med lite av samma typ av laddinfrastruktur (nivå 1 i Tabell 1). På samma sätt har scenarier med nivå 1 parats ihop med scenarier med nivå 2. För varje par har skillnaden i total utjämnad kostnad för investeringar i den berörda typen laddinfrastruktur beräknats, samt skillnaden i total utjämnad systemkostnad. Eftersom systemet är självreglerande och riktigt olönsamma investeringar alltid undviks innebär en ökad nivå av investering främst att den typen laddinfrastruktur erbjuds på fler platser, med direkt följd att fler rutter kan elektrifieras. Tillgång till en typ av laddinfrastruktur på fler platser får också indirekt följden att investeringsnivån i andra typer av laddinfrastruktur kan anpassas till det nya utbudet, oftast i form av en minskad investering (Figur 17). Metoden

för denna beräkning av avkastning tar alltså inte hänsyn till kostnaden för strandade tillgångar som konkurreras ut av den tillförda infrastrukturen. Alla scenarier i scenariomatriken har beräknats för modellår 2035. Enligt Figur 14 ökar avkastningen (marginalvärdet) av laddinfrastruktur med tiden, från låga nivåer modellår 2020.

Ur spridningsdiagrammet i Figur 16 framgår att elvägar och depåladdning är de typer av laddning som ger störst systemkostnadssänkning per tillförd investering vid låga nivåer av transportelektrifiering. Notera dock att de ”låga” investeringsnivåer som diskuteras här är möjlighet att ladda vid 25 % av alla lastbilsdepåer och 2 000 km dubbelriktad elväg. Resultaten kan inte antas generalisera till mycket låga investeringsnivåer, som en pilotsträcka för elväg eller laddning vid ett godtyckligt valt tiotal lastbilsdepåer. En ytterligare förlängning av elvägnätet till 6 000 km⁹ är alltid kostnadsbesparande, men denna investering är inte mer kostnadseffektiv än investering i andra former av laddinfrastruktur.

När tillgången till laddinfrastruktur redan är så god att transportelektrifieringen nått medelhöga nivåer övergår snabbbladdarstationer till att bli den mest kostnadsbesparande typen av infrastruktur att tillföra till systemet. Separat analys som inte visas i figuren indikerar att nya snabbbladdarstationer är den form av laddinfrastruktur som mest kostnadseffektivt möjliggör (kostnadsbesparande) elektrifiering av nya rutter, särskilt vid redan höga nivåer av elektrifiering.



Figur 16. Avkastning på investering i laddinfrastruktur, beräknad som minskning i total systemkostnad till följd av tillförsel av respektive typ av laddinfrastruktur. Varje markör motsvarar ett scenariopar från scenariomatriken (se text). Mindre markörer indikerar ett steg från ingen till lite infrastruktur (nivå 0 till nivå 1 i Tabell 1) och större markörer indikerar ett steg från lite till mycket infrastruktur (nivå 1 till nivå 2). Kostnadsbesparingar på systemnivå uppstår främst genom att fler rutter kan elektrifieras och genom minskade investeringar i andra typer av laddinfrastruktur.

⁹ Erbjudet vägnät i scenariot. Efterfrågad elväg blir kortare, ca 4 000 km vägnät.

3.6 Substitutionseffekter mellan elvägar och annan laddinfrastruktur

Forskningsfråga: Hur interagerar elväg och annan laddinfrastruktur placerad exempelvis vid lastbilsdepåer, godsterminaler och rastplatser? Vad är lämpliga kombinationer av dessa?

Forskningsfråga: Hur förändras efterfrågan på olika typer av laddinfrastruktur under tiden fordonspopulationen elektrifieras och laddinfrastrukturen förtätas?

Att starka interaktionseffekter mellan olika typer av laddinfrastruktur finns är uppenbart. Ett fast antal elfordon med en fast sammanlagd årlig körsträcka kräver samma mängd elektrisk energi för att drivas oavsett var och när laddning sker (bortsett från överföringsförluster). Etableras laddinfrastruktur över någon nivå kommer ytterligare laddinfrastruktur antingen stå oanvänd, eller orsaka minskad användning av annan laddinfrastruktur. Under övergångsperioden då tillgång till laddinfrastruktur fortfarande är en begränsande faktor för elektrifiering kan ytterligare laddinfrastruktur dock i stället möjliggöra att fler fordon elektrifieras, vilket kan bidra till ökad användning av redan existerande laddinfrastruktur.

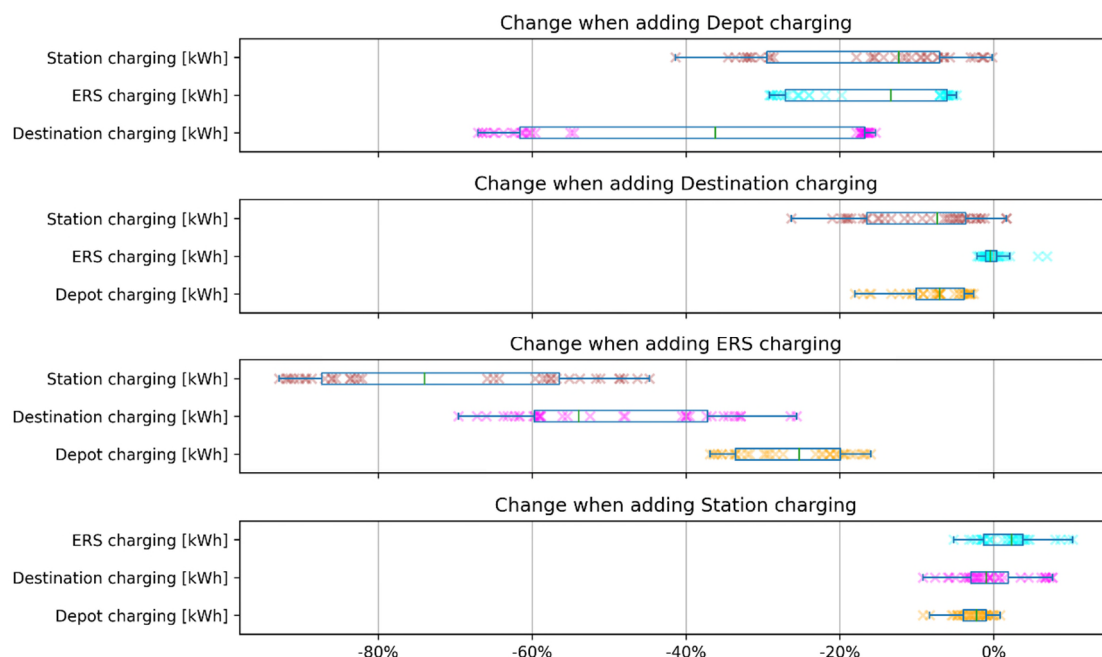
Ur scenariomatrisen valdes scenarier ut som antingen saknade elväg eller innehöll elväg med 300 kW maxeffekt per fordon och 50 % täckningsgrad längs elektrifierat vägnät (150 kW medeleffekt per km): totalt $3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 = 81$ scenarier. Dessa 81 scenarier kan på många sätt delas in i 27 grupper av tre scenarier, där tillgången på en typ av laddinfrastruktur L förändras inom gruppen (ingen, liten, samt god tillgång) och övriga typer av laddinfrastruktur hålls oförändrad. Scenarion med liten samt god tillgång till laddinfrastruktur av typ L jämförs med motsvarande scenario utan samma laddinfrastruktur. Skillnaden i total levererad energi från varje annan typ av laddinfrastruktur kan då beräknas, med och utan L .

Figur 17 visar hur dessa interaktionseffekter fördelas. Vid tillförsel av depåladdning minskar användningen av destinationsladdning (ca -20 % eller -60 %, sannolikt beroende på mängd tillförd depåladdning) och av stations- och elvägsladdning (ca -10 till -30 %).

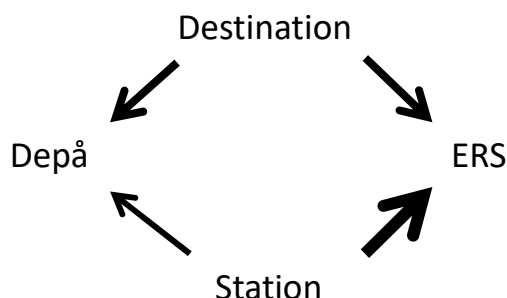
Tillförsel av elväg leder till en mycket kraftig minskning av total nationell användning av snabbbladdarstationer (ca -50 till -90 %), med störst effekt längs elvägens sträckning. Elväg bidrar också till en minskad användning av destinationsladdning (ca -30 till -60 %) och depåladdning (ca -20 till -40 %).

Tillförsel av infrastruktur för snabbbladdning har relativt liten påverkan på användningen av annan laddinfrastruktur, oavsett om dessa snabbbladdare placeras vid utpekade rastplatser eller vid destinationer.

Eftersom tillförsel av ytterligare laddinfrastruktur i nästan alla scenarier medför att en större andel av den totala trafiken övergår från diesel- till eldrift skulle en fullständig avsaknad av substitutionseffekter synas i form av ett ökat energiuttag från befintlig laddinfrastruktur när kompletterande infrastruktur tillförs. Skulle effekterna beräknas som energiförsäljning per kund per plats bör minskningarna alltså bli större än i figuren.



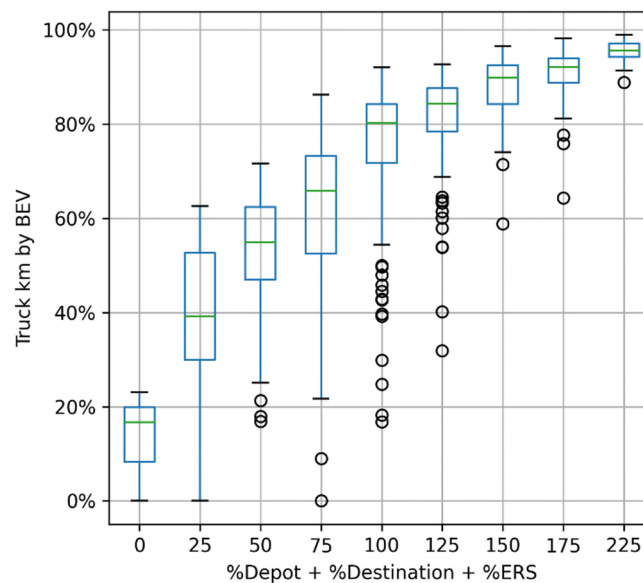
Figur 17. Förändring av såld energi per laddinfrastrukturplacering, vid tillförsel av annan laddinfrastruktur. Varje kryss representerar ett scenario i scenariomatrisen, men endast scenarier helt utan elväg eller med 300 kW och 50 % elektrifieringsgrad har inkluderats. Fördelningarna representerar endast spridningen bland de utvärderade scenarierna.



Figur 18. Schematisk representation av de tydligaste substitutionseffekterna i Figur 17: vid tillförsel av depåladdning eller elväg minskar den totala energin levererad via snabbplattor vid destinationer och rastplatser. Den starkaste substitutionseffekten är att elvägar kraftigt minskar nyttjandet av publika snabbplattorstationer.

Alla dessa interaktionseffekter i systemet gör det svårt att själv resonera om vilka kombinationer av laddinfrastruktur som möjliggör en elektrifiering av den tunga vägtrafiken.

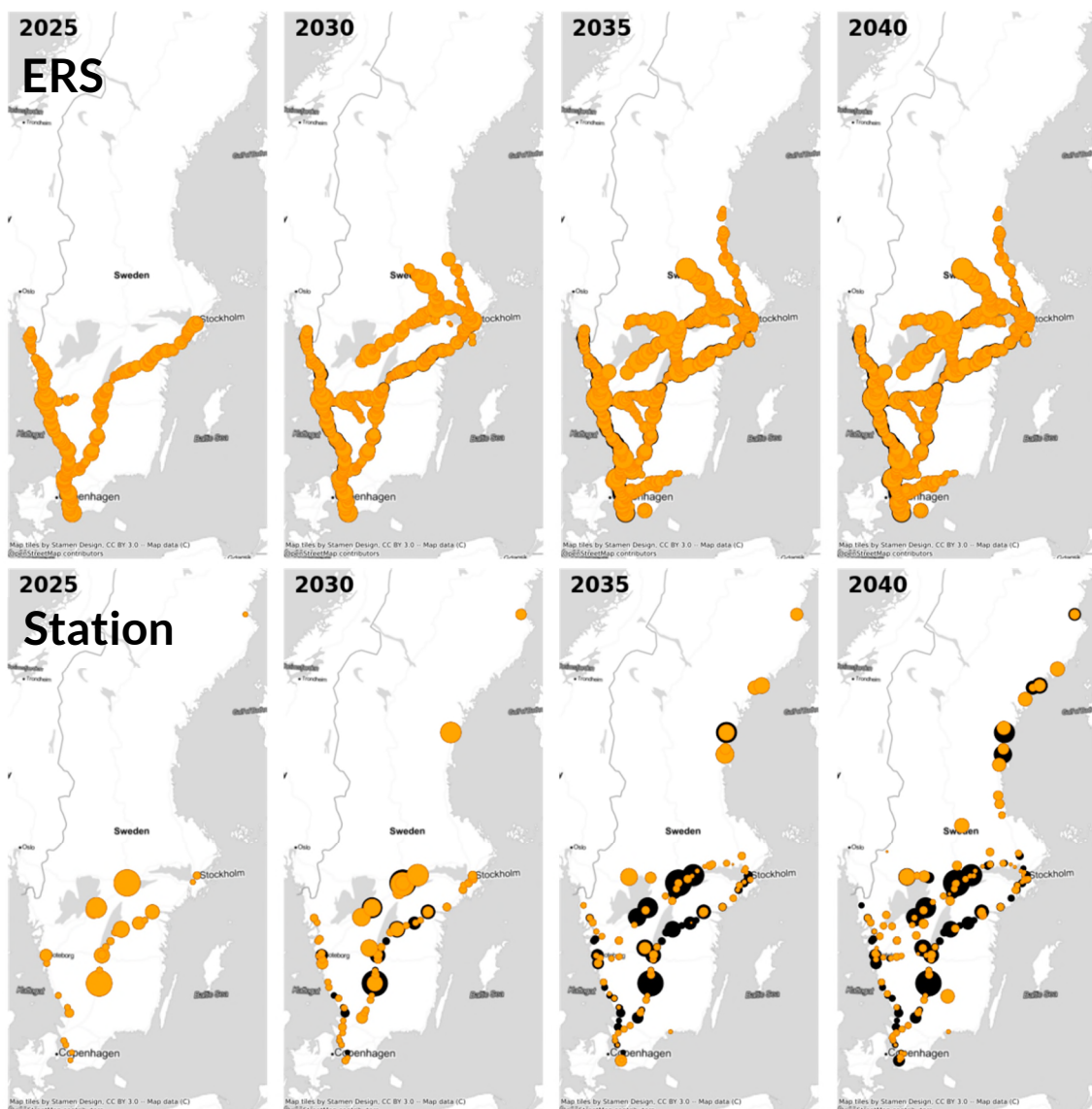
Trots de starka interaktionseffekterna i systemet kan en tumregel användas för att skatta hur stor andel av den tunga vägtrafiken som kommer att elektrifieras på sikt, givet en föreslagen nivå av tillgång till laddinfrastruktur. Först och främst krävs god tillgång till minst två av depåladdning, destinationsladdning och elväg. Om mängden depåladdning och destinationsladdning uttrycks som andelen av alla transportrutter som har tillgång till dessa former av laddning (0–100 % vardera) och mängden elväg uttrycks som andel av 8 000 km vägnät (0–100 %) behöver summan av dessa procentsatser uppgå till minst 150 för att 90 % av trafikarbetet med tunga fordon ska elektrifieras. Figur 19 illustrerar hur graden av transportelektrifiering varierar för scenarierna i scenariomatrisen, som funktion av denna summa. Elvägen bör som tidigare identifierats erbjuda en medeleffekt på minst 150 kW, inklusive oelektrifierade gap i elvägen.



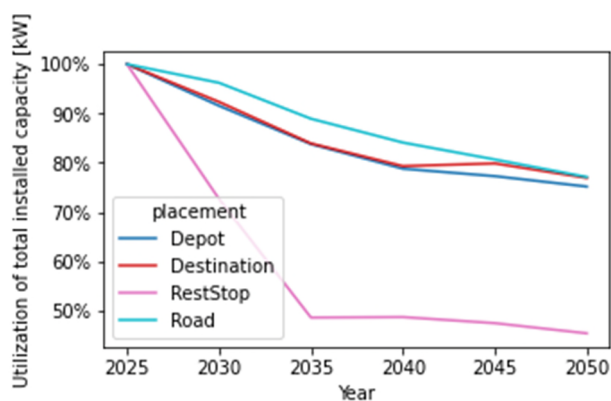
Figur 19. Grad av transportelektrifiering vid olika totala nivåer av tillgång till depåladdning, destinationsladdning och elväg.

En konsekvens av de identifierade substitutionseffekterna ovan är en betydande risk för att tidigt etablerade publika snabbbladdarstationer längs de större vägarna konkurreras ut av en senare byggd elväg. Figur 20 visar hur installerad respektive efterfrågad simultan maxeffekt utvecklas per plats för snabbbladdarstationer och för elvägsegment. Data är från scenariot "fast, dynamic" från Tabell 2. I simuleringen plockas ingen laddinfrastruktur bort när den väl installerats, medan efterfrågan kan minska över tid. Överdimensionerad laddinfrastruktur resulterar i en högre brukarkostnad per kWh än laddinfrastruktur som är korrekt dimensionerad efter efterfrågan, vilket försvårar konkurrensläget och genom återkopplingseffekter kan resultera i att infrastrukturen helt slutar användas.

Figur 21 visar hur den sammanlagda nyttjandegraden utvecklas för de fyra olika typerna av laddinfrastruktur. Nyttjandegrad definieras i den här figuren som efterfrågad toppeffekt i förhållande till installerad toppeffekt.



Figur 20. Installerad (svart) och nyttjad (orange) elektrisk effekt per plats, för åren 2025–2040 i scenariot "fast, dynamic" från Tabell 2. I scenariot etableras inga nya platser för laddinfrastruktur efter modellår 2040. De största cirkelarna motsvarar 9 MW. I detta scenario nyttjas i snitt (median) 440 kW per fortfarande använd snabbbladdarstation år 2040. ERS-effekt är här per vägsegment, vilka har varierande längd, varför det för ERS endast är möjligt att dra slutsatsen att användningen av redan byggd elväg inte minskar över tid.



Figur 21. Andel av total installerad elektrisk effekt som nyttjas, per placeringsalternativ, för åren 2025–2050 i scenariot "fast, dynamic" från Tabell 2.

3.7 Interaktionseffekter mellan elvägar och fordonsbatterier

Forskningsfråga: Vilken typ av laddinfrastruktur är den mest kostnadseffektiva metoden att elektrifiera den tunga lastbilstrafiken?

Hur påverkar en elväg behovet av batterikapacitet i tunga elektriska lastbilar?

3.7.1 Elvägar minskar batterislitage och batterikapacitet per lastbil

Över en tidsperiod på 5–10 år kan fordonsbatterier betraktas som en konsumtionsvara, för vilken tillgången är begränsad, åtminstone under kommande årtionde. En snabb elektrifiering av vägtransporter underlättas därför av infrastrukturlösningar som minskar konsumtionstakten av batterier. Konsumtionstakten bestäms av antal elektrifierade fordon, storleken på batteripack i dessa fordon och hur snabbt dessa battericeller åldras genom användning. Ökad packkapacitet bidrar till minskad cellåldring: ett batteripack består (förenklat) av ett stort antal parallellkopplade battericeller och en dubbling av antalet battericeller i ett fordon resulterar i att hälften så mycket energi flödar genom varje cell, vilket förlänger livslängden på cellerna. Battericeller utsätts även för så kallad kalenderåldring som är oberoende av användning, med konsekvens att även mycket stora batteripack har en begränsad livslängd.

Modellen som används för batteriåldring i simuleringen är en förenkling av verklighetens mycket komplicerade elektrokemiska förlopp. Batteriåldring beräknas som summan av kalenderåldring (konstant per tidsenhet) och cykelåldring (kvadratisk ökande med c-rate, ner till en effektoberoende lägstanivå per kWh), där cykelåldring beräknas separat för laddning och urladdning. Hastigheten för både kalender- och cykelåldring är parametersatt och minskar i takt med antaganden om bättre batteriteknik för senare modellår. Batteriåldring mäts här i enheten Wh/fordonskilometer, där Wh är den kapacitetsförlust som användningen resulterat i.

Batteriåldring påverkas i verkligheten av batteriets energinivå, så kallad "state-of-charge", så att fulladdade batterier åldras snabbare. Åldring är även temperaturberoende. Dessa beroenden har inte inkluderats i modellen, då även betydligt mer avancerad hantering av olika laddstrategier skulle krävas för att undvika att den förbättrade batteriåldringsmodellen främst resulterar i felaktiga analysresultat.

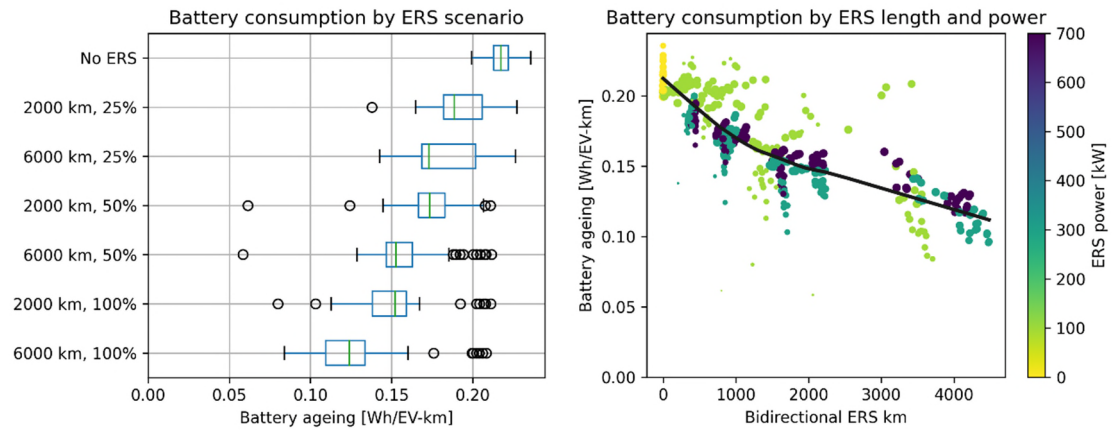
Vid en jämförelse av de olika scenarierna i scenariomatrisen har endast två faktorer identifierats som tydligt påverkar batterikonsumtionstakten per elektrifierad fordonskilometer: elvägnätets totala längd och täthet (elektrifieringsgrad). Sambandet bör förklaras av att körning på elväg möjliggör att energi överförs direkt från laddinfrastruktur till elmotor, utan att bidra till batteriåldring. Ett större och tätare elvägnät gör därför att en minskad andel av all elektrisk transportenergi passerar batterier. Figur 22 visar hur scenarier med olika tillgång till infrastruktur för statisk laddning och olika elvägseffekt är fördelade för olika kombinationer av de två identifierade parametrarna. Enligt simuleringen resulterar 1 000–4 000 km dubbelriktad elvägsinfrastruktur på ett 2 000–6 000 km stort vägnät år 2035 i en reduktion av batterikonsumtionen per elektrifierad fordonskilometer med ca 25–55 %.

jämfört med elektrifiering utan elväg. Eftersom elvägen också bidrar till att en större andel av lastbilstrafiken elektrifieras så reflekteras inte denna minskning per fordonskilometer nödvändigtvis i totalt minskad batterikonsumtion på systemnivå. Slutsatsen är snarare att en elväg bidrar till snabbare elektrifiering, genom att samma antal battericeller räcker till att elektrifiera fler fordon.

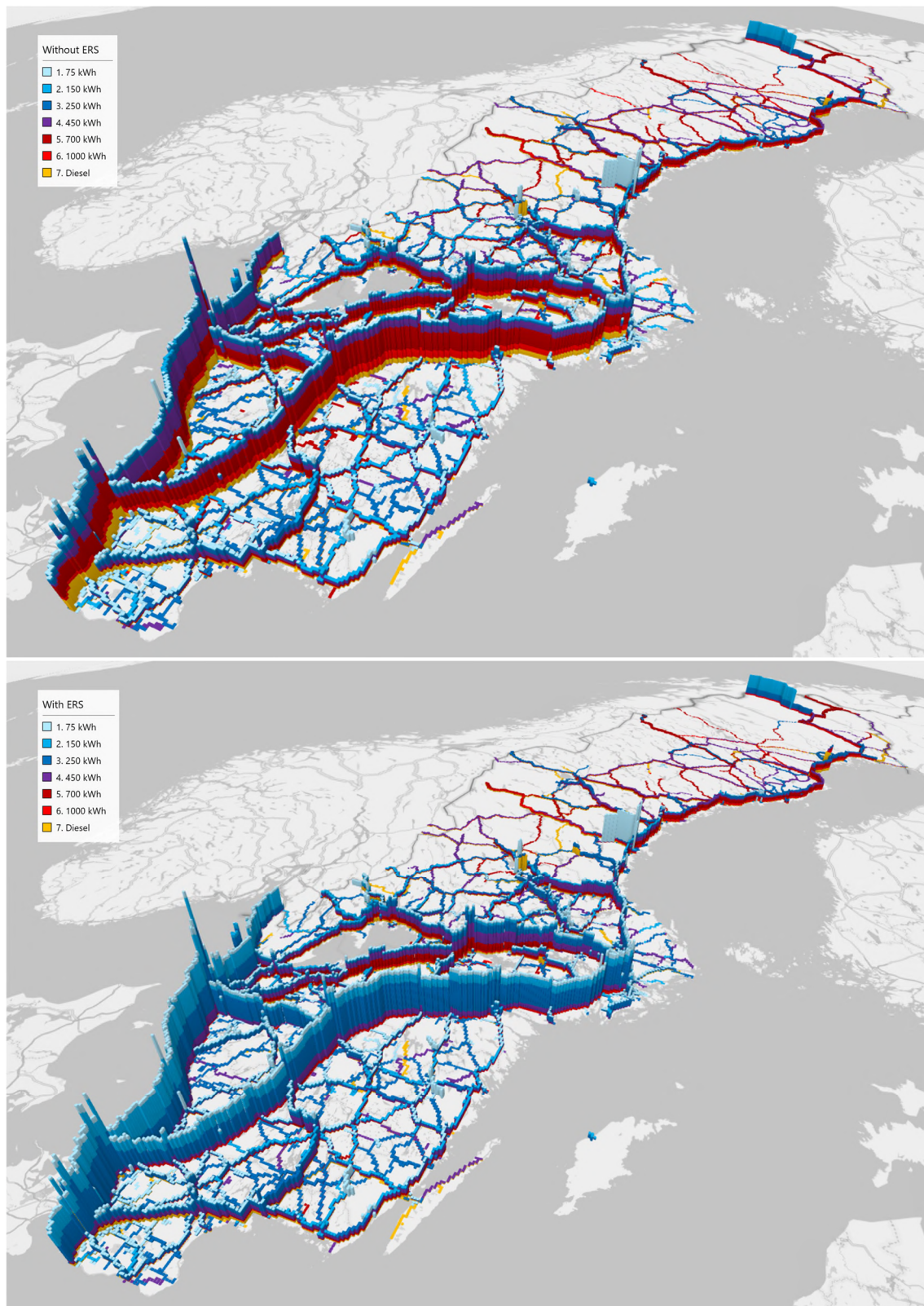
Man bör samtidigt ha i åtanke att konsumtionen av fordonsbatterier totalt domineras av användning i personbilar. Svenskregistrerade personbilar kör totalt ca 60 miljarder km varje år (Melkersson, 2021) och en eldriven personbil drar ca 0,2 kWh/km, vilket innebär att personbilarna totalt förbrukar ca 12 TWh/år vid full elektrifiering. Tunga lastbilar på det svenska vägnätet konsumerar ca 7 TWh/år vid full elektrifiering, enligt våra trafikdata och parameterantaganden. Antalet svenskregistrerade personbilar är ca 5 miljoner och antalet svenskregistrerade tunga lastbilar är ca 80 000. Om batteripacket i snitt har en kapacitet på 50 kWh i en personbil och 500 kWh i en tung lastbil krävs 250 GWh lagringskapacitet i personbilsflottan och 40 GWh i den tunga lastbilsflottan (exkl. utländska lastbilar på svensk väg). Kalenderåldring är den dominerande formen av batterislitage för personbilar (Redondo-Iglesias m.fl., 2018), medan förhållandet mellan kalenderåldring och cykelåldring verkar vara relativt jämnt för lastbilarna i simuleringsmodellen.

Om vi antar att total cykelåldring är proportionerlig mot total energikonsumtion och total kalenderåldring är proportionerlig mot total installerad batterikapacitet ger en överslagsräkning alltså att lastbilar står för en tredjedel av cykelåldringen och en sjundedel av kalenderåldringen och behovet av råmaterial. Inkluderas trafik med utländska lastbilar blir andelarna något högre. Om en elväg ska ha en meningsfull påverkan på konsumtionstakten av fordonsbatterier behöver elvägen framför allt skapa förutsättningar för att batterikapaciteten per personbil kan reduceras. Tidigare forskning har visat att kontinuerlig elväg kan reducera den nödvändiga batterikapaciteten per personbil med 50 (Morfeldt m.fl., 2022) till 75 (Shoman m.fl., 2021).

Dessa resultat för personbilar är helt i linje med resultaten från experimenten som presenteras här för tunga lastbilar. I Figur 23 visas hur batterikapaciteten per lastbil påverkas av att ca 2 000 km elväg på det svenska vägnätet tillförs, utöver tillräckligt god tillgång till annan laddinfrastruktur för att merparten av trafiken ändå ska kunna elektrifieras även utan tillgång till elväg. Merparten av lastbilstrafiken längs de större motorvägarna kräver utan elväg batteripack på 450–1 000 kWh, medan samma trafikarbete kan utföras med lastbilar utrustade med batteripack på 150–250 kWh om elväg finns längs sträckan: en reduktion på ca 70 % per lastbil.



Figur 22. Batterikonsumtion per fordonskilometer år 2035, för olika storlekar på elvägnät med olika elektrifieringsgrad och effekt. Fordonskilometer inkluderar i denna figur all elektrifierad tung trafik på hela det svenska vägnätet, även utanför elvägnätet. Figuren till vänster är grupperad per scenariokonfiguration och figuren till höger visar utfall efter optimering. För ruttor och fordon som nästan uteslutande går på elväg behöver batteripack endast dimensioneras efter önskad uteffekt utanför elvägen. Batteriåldringen domineras i dessa fall helt av kalenderåldring, vars kostnad är proportionerlig mot batterikapaciteten. Scenarier med avvikande låg batteriåldringstakt (cirklar till vänster om låddiagrammen i den vänstra figuren) är alla sådana där en mycket liten andel av den totala trafiken elektrifierats. I den högre figuren indikerar större cirklar scenarier med en högre andel elektrifierad trafik.



Figur 23. Fördelning av batterikapacitet i kWh per lastbil för trafiken längs det svenska vägnätet utan elväg (övre bild) och med elväg (nedre bild). Stapelhöjd är proportionerlig mot årlig dygnsmedeltrafik (tung). De två scenarierna som använts är ur scenariomatrisen: laddning vid 75 % av depåer, 25 % av destinationer, 75 % av utpekade rastplatser och ingen eller medelgod tillgång till elväg (2 000 km, max 700 kW per fordon, 50 % täckningsgrad).

3.7.2 Minskat batteribehov möjliggör lägre transportkostnad

I avsnitt 3.6 framkom att elvägar har en tendens att konkurrera ut annan laddinfrastruktur, medan det omvända inte gäller. Samtidigt visade Figur 10 att vid en mycket storskalig utbyggnad av elväg kan kostnaden per kWh för elvägar ligga långt över kostnaden för andra typer av laddinfrastruktur. Elvägens starka konkurrenskraft förklaras alltså inte av att själva infrastrukturen alltid skulle vara billigare än annan laddinfrastruktur.

En tydligare kostnadsbesparande effekt presenteras här. Tabell 6 visar hur stor andel av transporter med olika fordonsklasser som går att utföra med olika kombinationer av laddstrategi och batterikapacitet. Strategier som inkluderar dynamisk laddning via elväg (d.v.s. tillgång till elväg) gör det möjligt att trafikera en betydligt större andel av alla rutter med fordon utrustade med små batteripack. Strategier som endast nyttjar statisk laddning kräver stora batteripack för att rutten ska gå att genomföra vid eldrift.

Figur 24 visar hur den totala kilometerkostnaden för transporter längs en rutt påverkas av valet av laddstrategi och batterikapacitet. Figuren (och tabellen) baseras på ett sampel av ca 14 000 rutter för vilka kostnaden för samtliga alternativ beräknats utan någon förändring av tillgänglig laddinfrastruktur¹⁰. Kilometerkostnaden är normerad¹¹ efter kostnaden med den största valbara batterikapaciteten tillsammans med den mest generösa laddstrategin (AllPlannedStopsAndErs, där all laddinfrastruktur används).

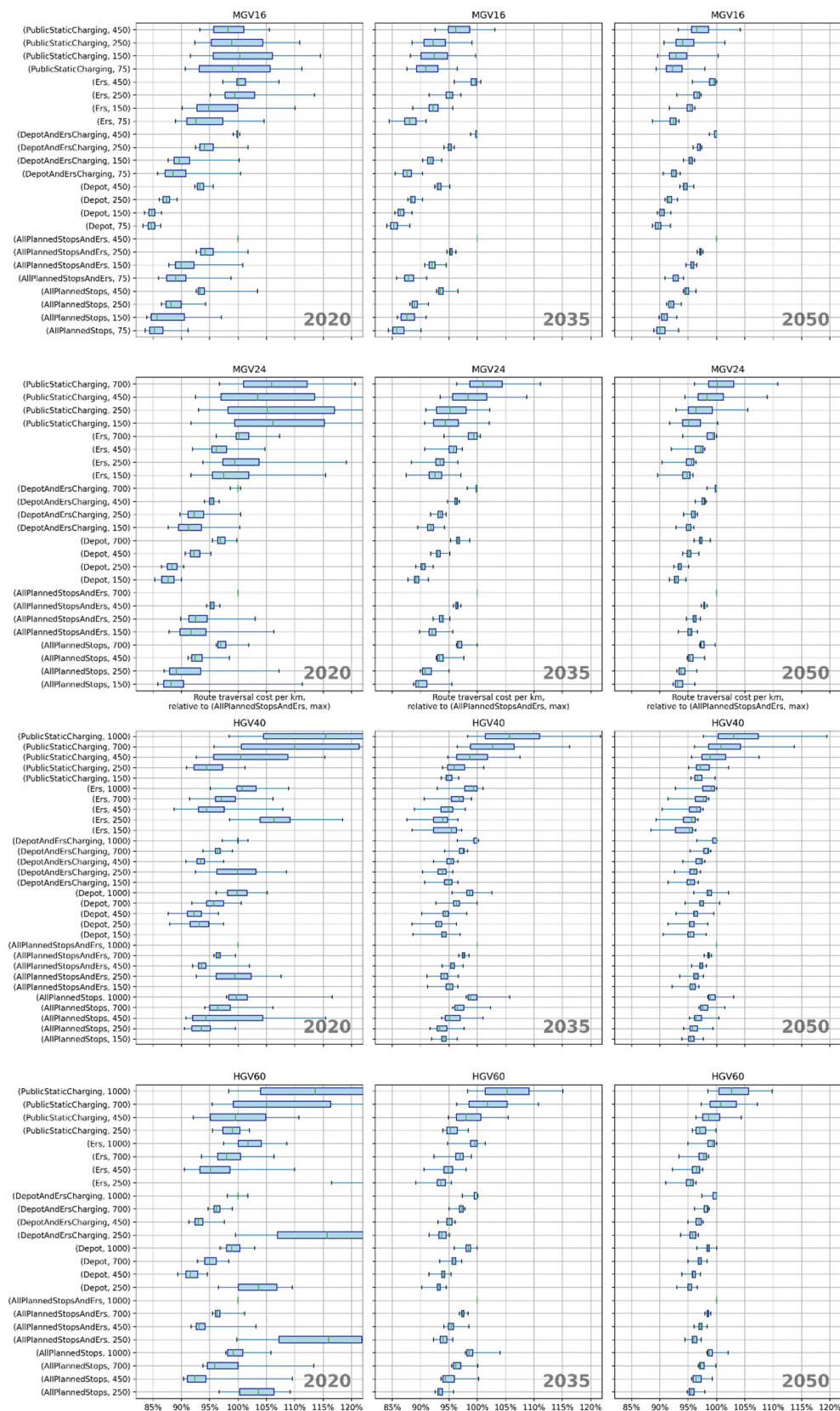
Med oförändrad batterikapacitet finns ingen tydlig kostnadsskillnad mellan olika laddstrategier. Däremot sjunker kostnaden om ett mindre batteripack väljs, oberoende av valet av laddstrategi, samtidigt som små batteripack oftare är valbara endast om elväg används. Kostnadsskillnaderna på ca 5 % kan sättas i relation till vinstmarginalerna inom åkeribranschen som idag är ca 4–8 % (Holmquist, 2020). Erbjuds elväg längs en sträcka blir det sannolikt svårt för åkeriföretag att bibehålla sina marginaler i konkurrens med andra åkerier om de inte väljer att anpassa sina fordon till elvägsdrift. I simuleringsmodellen leder elväg till minskad battericyklning, och mindre batteripack leder till minskade kostnader för kalenderåldring och minskade räntekostnader för bundet kapital. Andra studier som inte hanterar dessa återkopplingseffekter kan inte antas identifiera samma fenomen.

¹⁰ Experimentet använde ett scenario med depåladdning vid 80 % av rutterna, destinationsladdning vid 25 % av rutterna, snabbladdarstationer vid alla utpekade platser samt 3 000 km elväg med max 500 kW per brukare och 35 % täckningsgrad. Laddinfrastrukturen dimensionerades först på samma vis som i övriga experiment, följt av kostnadsberäkning för varje alternativ och varje rutt.

¹¹ Normeringen är nödvändig eftersom antalet rutter som kan trafikeras med eldrift minskar med mer restriktiva laddstrategier och batterikapaciteter, samtidigt som kilometerkostnaden för grundalternativet har observerats öka med sannolikheten att en rutt kan trafikeras med ett litet batteripack. Utan normering ger medelvärdesbildning av de absoluta kostnaderna i stället det felaktiga intrycket att lägre batterikapacitet ger högre transportkostnad.

Tabell 6. Procent av rutter som kan trafikeras med olika kombinationer av batterikapacitet och laddstrategi, för modellår 2035, 3 000 km elväg (500 kW, 35 % täckning) och god tillgång till infrastruktur för statisk laddning. Låddiagrammen i Figur 24 visar kostnadsspridningen för dessa subset av rutter som kan elektrifieras. De exakta procenttalen i tabellen beror helt av scenarioval – syftet är att illustrera mönstret att elväg gör det möjligt att trafikera betydligt fler rutter även med små batteripack.

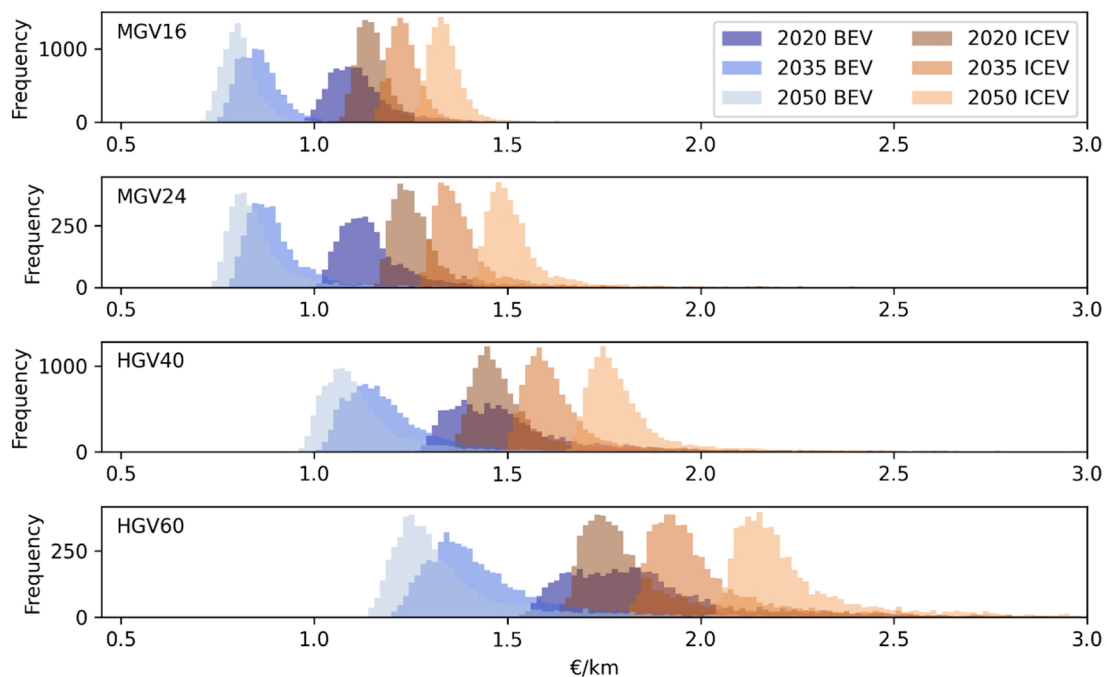
		HGV60				HGV40				MGV24				MGV16				
		250 kWh	450 kWh	700 kWh	1000 kWh	150 kWh	250 kWh	450 kWh	700 kWh	1000 kWh	150 kWh	250 kWh	450 kWh	700 kWh	75 kWh	150 kWh	250 kWh	450 kWh
Charging strategy	AllPlannedStopsAndErs	48	76	89	93	37	60	83	92	94	73	87	94	94	52	81	92	95
	DepotAndErsCharging	43	64	76	82	33	53	71	82	86	66	81	90	91	47	71	85	91
	AllPlannedStops	15	40	72	86	8	17	60	81	89	34	66	86	87	11	44	73	88
	Ers	21	32	36	39	18	32	44	48	51	43	52	57	58	33	54	64	68
	Depot	13	27	43	58	7	13	28	48	65	25	45	70	78	9	20	41	67
	PublicStaticCharging	2	6	12	18	1	3	7	13	17	7	13	20	20	2	6	6	6



Figur 24. Spridning av kostnad per fordonskilometer för olika kombinationer av batterikapacitet, laddstrategi och år längs olika rutter. Värderna har normerats så att 100 % representerar kostnaden för laddstrategin AllPlannedStopsAndErs med fordonsklassens största batterikapacitet. Batterikapaciteter som saknar värde vissa år ger otillräcklig uteffekt för fordonsframdrift. Låddiagrammen visar 5:e, 25:e, 50:e, 75:e och 95:e percentilerna för den normerade kostnaden.

Modellen tar även hänsyn till effekter av att fordonsbatteriers vikt och volym påverkar fordonens lastkapacitet (se metodbeskrivning) och att val av mindre batteripack därför gör att något färre resor krävs för att frakta allt gods som går längs en rutt varje år. Författaren har inte fullt ut lyckats förstå om och i så fall för vilka rutter denna effekt är av betydelse. En analys som inte hade antagit att minskad fordonsvikt medför ökad last per resa hade i stället behövt ta hänsyn till att minskad energikonsumtion och däckslitage följer av en minskad ekipagevikt. Energiåtgång och däckslitage har i modellen antagits vara oförändrade, eftersom ekipagevikten inte antas ändras.

Figur 25 visar spridningen av den onormerade företagsekonomiska kostnaden i euro per km för dieseldrift och för den BEV-kombination av batterikapacitet och laddstrategi som ger lägst kostnad. Kostnaden är högre för tyngre fordon, ökar med tiden för ICEV och minskar med tiden för BEV. För BEV påverkas kostnaden av scenarioval och de kostnader som visas i figuren kan betraktas som de lägsta som kan uppnås med de parameterantaganden som gjorts, men trenden är tydlig – så fort laddinfrastruktur görs tillgänglig blir det mycket svårt för dagens dieseldrivna lastbilar att konkurrera med eldrift ur ett kostnadsperspektiv, i alla viktklasser. Efter 2030 är kostnadsfördelar för eldrift på ca 50 eurocent per km inte orimliga, vilket motsvarar ca 50 000 euro per fordonsår, inräknat brukarkostnaden för laddinfrastruktur.



Figur 25. Spridning av företagsekonomisk kostnad per fordonskilometer beräknad för ett sampel på ca 14 000 rutter, för dieseldrift (ICEV) och den BEV-kombination av batterikapacitet och laddstrategi som ger lägst kilometerkostnad.

3.8 Elvägars nyttjandegrad och geografiska spridningseffekter

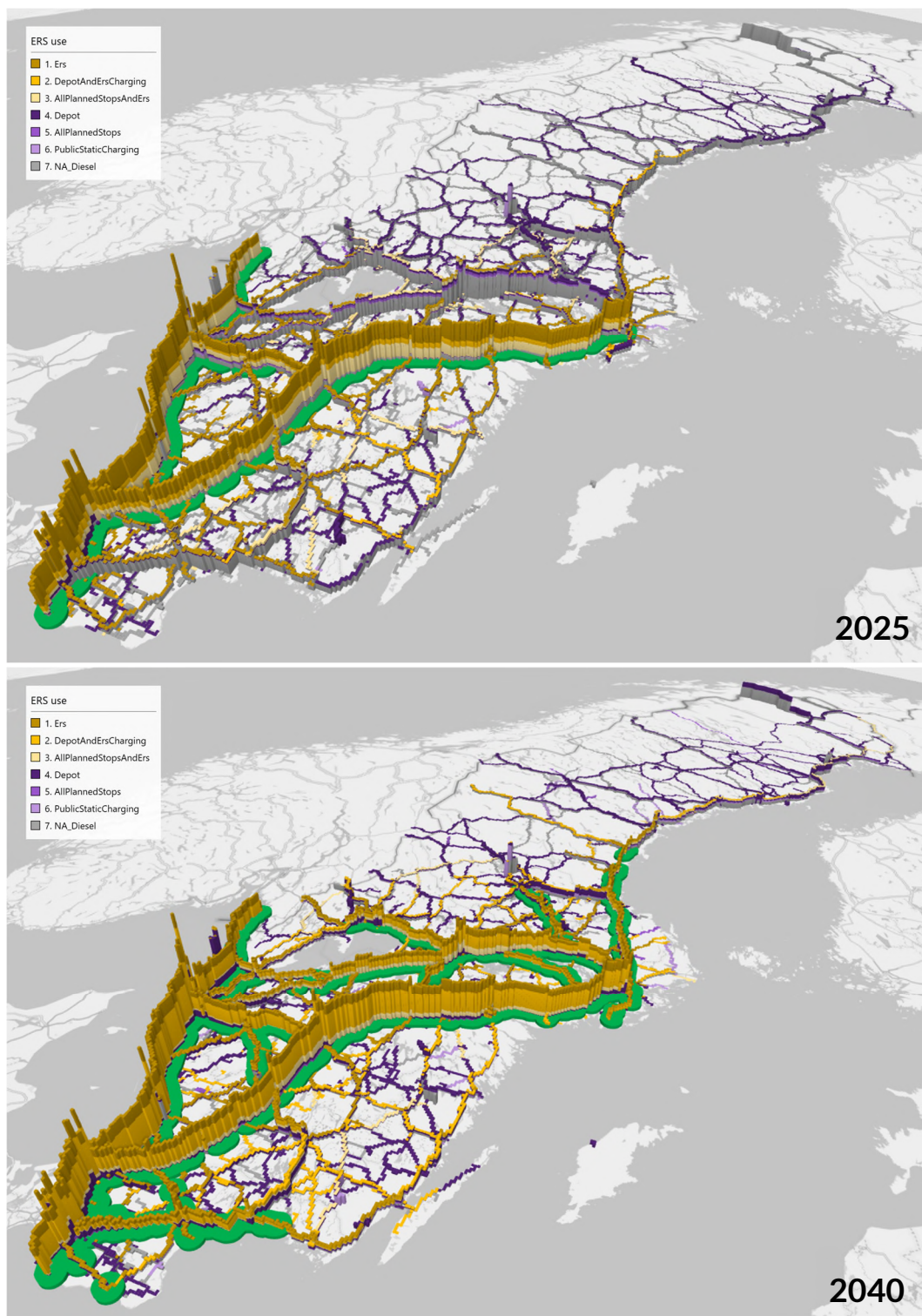
Forskningsfråga: Vilken andel av lastbilstrafiken på och utanför det elektrifierade vägnätet skulle nyttja en elväg?

En debatterad fråga i Sverige är i vilken utsträckning en potentiell framtida elväg skulle nyttjas av den tunga trafiken på vägarna. Som tidigare påpekats är resultaten i den här studien begränsade till ett implicit antagande om att laddinfrastruktur motsvarande den i Sverige byggs ut även i grannländerna. Exakta andelar av elvägsnyttjande trafik varierar mellan olika scenarier, modellår och sträckor, men i de fall som undersökts har andelen legat i intervallet 60–100 %, med större andelar tidigare modellår. Efter modellår 2040 minskar andelen elvägsnyttjande trafik något längs de elektrifierade vägsträckorna, till förmån för depåladdning, men andelen sjunker inte under 60 %. Ett typiskt scenario presenteras i Figur 26. Notera att figuren inte visar hur stor andel av energin som tas från elvägen; endast att en laddstrategi som inkluderar laddning från elväg är kostnadsminimerande för de rutten som passerar ett givet vägavsnitt.

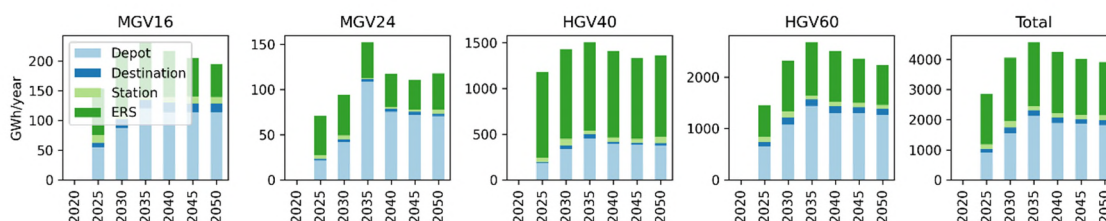
I figuren är det även möjligt att studera geografiska spridningseffekter, det vill säga hur stor andel av trafiken utanför elvägnätet som drar nytta av elvägen längs andra delar av rutten. Tydligast syns detta på vägnätet i regionen mellan Göteborg, Jönköping och Helmsingborg, som omges av elväg och där ca 50 % av trafikarbetet sker med elvägsutrustade fordon, trots att elväg saknas. Nivåer runt 50 % verkar vara rimliga för oelektrifierade sträckor som går mellan elektrifierade sträckor. Det oklart hur väl resultaten för det svenska vägnätet generaliserar till uttalanden om hur spridningseffekterna skulle se ut på andra vägnät än det svenska, men i Sverige verkar andelen elvägsnyttjande trafik gradvis avta inom en radie på 150–200 km från elvägen. Spridningseffekter syns även inom elvägnätet. Ca 50 km från dess utkant (syns tydligast norrut i kartorna) börjar andelen elvägsnyttjande trafik avta, för att passera en nivå på ca 50 % vid gränsen mellan elektrifierat och oelektrifierat vägnät.

Andelen energi som levereras från laddinfrastruktur med olika placering motsvarar inte andelen trafik som laddas på samma vis. I samma scenario levereras knappt 50 % av energin som krävs för att driva all tung trafik i landet från elväg (Figur 27). Andelen energi från elväg är störst för fordon i viktclassen HGV40, vilket är en viktclass som ofta används för internationella långdistanstransporter. Lägst är andelen energi från elväg för viktclassen MGV16, vilket är väntat. Andelen energi från publika respektive semipublika laddstationer vid rastplatser och destinationer är ca 5 % för samtliga fordonsklasser i scenariot och återstoden av energin tas från depåladdare. Andra scenarier ger andra fördelningar, men där alternativen depåladdning och/eller elväg erbjuds tenderar de att dominera.

Det är inte möjligt att endast från Figur 27 dra slutsatsen att någon form av laddinfrastruktur är mindre viktig än någon annan. Även ett fordon som kör 1 000 km längs elväg kan behöva göra ett stopp vid en snabbbladdarstation utanför elvägnätet för att nå sin destination. Däremot kan figuren ge indikationer om hur energiförbrukningen från tunga transporter fördelas över dygnets timmar och mellan olika geografiska områden. Laddning vid depå antas främst ske nattetid i urbana områden, medan övriga former av laddning antas ske dagtid. Laddning vid elväg och till viss del snabbbladdarstationer sker främst utanför urbana områden, om elvägen inte används även av personbilar. Uppstår effektbrist på elmarknaden är det rimligt att anta att elpriserna går upp kraftigt dagtid. Detta skulle i så fall slå hårdast mot HGV40-trafik och åkerier med 24-timmarsdrift, vilka är starkt beroende av publik eller semipublik laddning dagtid.



Figur 26. Total trafik (ÅDT tung) som utgörs av rutter för vilka respektive laddstrategi är kostnadsminimerande. BEV-trafik som nyttjar elväg längs någon del av rutten indikeras i gula nyanser och BEV-trafik som aldrig nyttjar elväg indikeras i lila nyanser. Dieseldrift indikeras i grått. Scenariot som använts är "fast, dynamic" från Tabell 2. Scenariot inkluderar utöver elväg (grönt i figuren) god tillgång till laddning vid depå och medelgod tillgång till laddning vid destinationer och rastplatser, vilka inte visas i figuren. Andelen elvägsnyttjande trafik varierar för olika sträckor, scenarier och år, men har inte observerats ligga under 60 % av ÅDT på elektrifierade vägvsnitt i något scenario. Elväg ger större kostnadsfördelar tidigare år och nyttjandet minskar något till fördel för depåladdning efter 2040.



Figur 27. Andel av total energi levererad till varje viktklass av fordon, för varje placering av laddinfrastruktur, för varje år i scenariot "fast, dynamic" från Tabell 2.

4 Diskussion

4.1 Flaskhalsar i samhället påverkar vilken väg till elektrifiering som är bäst

Experimenten i denna rapport visar att elektrifiering av den tunga lastbilstrafiken är en framkomlig väg för att minska utsläppen i takt med de nationella mål som satts upp, och samtidigt en utveckling som är svår att hejda på grund av de stora företagsekonomiska besparingar som elektrifiering medför för transportindustrin.

Laddinfrastruktur är dock inte det enda som behöver komma på plats för att elektrifiering av lastbilstrafiken ska vara möjlig. Nya gruvor behöver öppnas för att utvinna mineraler till fordonsbatterier, fabriker och monteringslinor för elektriska lastbilar och batterier behöver komma på plats, nya komponenter till både fordon och laddinfrastruktur behöver designas, testas och tillverkas, montörer och installatörer behöver utbildas, byggtillstånd ska sökas och beviljas, upphandlings- och överklagandeprocesser ska genomföras, elnät och elproduktion behöver förstärkas, och en lång rad beslut ska fattas. Inom vissa av dessa områden, däribland tillgång till batterier och elektrisk effekt, konkurrerar lastbilstransporter med andra delar av samhället. Framtida batteribrist kommer sannolikt inte att orsakas av lastbilslektrifiering, men lastbilslektrifieringen kan komma att försenas på grund av att efterfrågan på batterier ökar kraftigt inom andra sektorer.

Samtliga nämnda områden har potential att bli flaskhalsar som bromsar omställningstakten och olika sammansättning av laddinfrastrukturen som byggs ut ställer olika krav på kapaciteten inom dessa områden. Scenarier där lastbilar behöver utrustas med mycket stora batteripack är mer känsliga för begränsningar inom batteriproduktionen, scenarier med en stor andel dagladdning är mer känsliga för effektbrist i elnätet, och scenarier med väldigt mycket av en viss typ av laddinfrastruktur förutsätter att produktions- och installationskapaciteten för den typen kan skalas upp tillräckligt fort för att möta efterfrågan, både inom och utom Sveriges gränser. Olika scenarier för laddinfrastrukturutbyggnad ställer också olika krav på vilka besluts- och tillståndprocesser som behöver gås igenom.

Total energimängd som krävs för allt transportarbete påverkas inte av valet av laddinfrastruktur, men tid och plats för effektuttag från elnätet styrs båda av den fysiska placeringen av laddinfrastrukturen. Historiskt har elpriset varit högre dagtid än nattetid, men prisskillnaden har inte varit tillräckligt stor för att transportkostnaden ska påverkas signifikant av när på dygnet ett fordon laddas. Däremot indikerar de högre elpriserna

dagtid att mycket mer kapacitetsutbyggnad kommer att krävas för dagladdning än för nattladdning, vilket sannolikt innebär att dagladdning inte är möjlig att bygga ut i samma takt som nattladdning. Informella diskussioner med ett fåtal experter inom elnätsområdet har gett indikationer om att det skulle kunna vara lättare att tillföra nödvändig elektrisk effekt dagtid till en elväg än till snabbbladdarstationer. Orsaken skulle vara att elvägen med större sannolikhet kan anslutas direkt till regionnäten, eftersom placeringen av nätanslutningspunkter kan väljas fritt längs vägen. Denna hypotes bör utredas vidare.

Med hänsyn tagen till alla dessa flaskhalsar representerar de framtidsscenarier som presenteras i denna rapport både genomförbara och ogenomförbara vägar framåt. Inför nationella beslut om utbyggnad av elväg bör man verifiera att valet endast står mellan alternativ som alla är genomförbara och som alla uppnår utsläppsmålen som satts för både 2030 och 2050. Scenarier som leder till måluppfyllelse har indikerats i Figur 7 och Figur 9, vilka alla representerar mycket snabb och tät utbyggnad av kombinationer av flera olika typer av laddinfrastruktur, med start omgående. Utesluts någon av de fyra simulerade typerna av laddinfrastruktur innebär det att utbyggnadstakten för de återstående typerna behöver öka. För delmålet 2030 finns många uppsättningar laddinfrastruktur som leder till måluppfyllelse, men från år 2040 krävs antingen att ca 6 000 km av det svenska vägnätet utrustas med elväg (inte nödvändigtvis med 100 % elektrifieringsgrad), eller att möjlighet till statisk laddning erbjuds vid nästan 100 % av lastbilsdepåer, nästan 100 % av utpekade rastplatser och ca 50 % av alla destinationer.

Modellens hantering av depåer och destinationer är dock en kraftig förenkling av verkligheten, där nästan alla förenklingar premierar statisk laddning över dynamisk. Använda parametervärden motsvarar i princip antaganden om att alla lastbilar används i enkelskift, att alla lastbilar parkeras nattetid vid en lastbilsdepå och att alla platser där gods lastas och lossas lämpar sig för installation av snabbbladdare för tunga lastbilar. I studien har antaganden också gjorts om hög nyttjandegrad för all typ av laddning (se avsnitt 8.4.1 för definition och beräkning av nyttjandegrad). För elvägar är antagen nyttjandegrad troligtvis ungefär rätt, men för statisk laddinfrastruktur motsvarar parametervärdena antaganden om att endast förhållandevis stora anläggningar byggs, med många samlokaliserade laddpunkter som delar på en gemensam nätanslutning. Lägre än antagen nyttjandegrad leder direkt till ökad brukarkostnad för laddning vid platsen. I takt med att statisk laddinfrastruktur byggs vid fler och fler platser blir det allt svårare att identifiera nya platser som kan uppnå samma höga nyttjandegrad, vilket sannolikt innebär att scenarier med antaganden om 100 % utbyggnad av en typ av statisk laddinfrastruktur troligtvis inte är praktiskt genomförbara. Lägre än förväntad nyttjandegrad har mycket större påverkan på brukarkostnaden än högre än förväntad kostnad för att bygga själva infrastrukturen.

Avsnitt 4.3 förklarar varför det inte verkar finnas några alternativ till fullskalig elektrifiering av den tunga lastbilstrafiken. Att Sveriges antagna utsläppsmål för vägtrafiken ska kunna uppnås utan storskalig etablering av elvägar framstår alltså som mycket osannolikt.

4.2 Jämförelse med upplevda risker med elvägar

Denna rapport är ett resultat av arbete inom ett arbetspaket i det större projektet Genomförbarhetsstudie av elvägpilot E22. Inom ett annat arbetspaket undersöktes

vilka risker potentiella användare av en elväg upplever inför ett framtida införande av tekniken. Dessa risker beskrivs utförligt i (Sällberg & Numminen, 2022) och för varje upplevd risk sammanfattas i Tabell 7 de relevanta resultaten från denna studie.

Tabell 7. Sammanfattning av studiens resultat med avseende på de upplevda risker som identifierats bland potentiella användare av en elväg.

Finansiell risk	Studiens resultat visar
Hög investeringskostnad	Vid full elektrifiering av lastbilstransporter är investeringskostnaden inte högre med elväg än andra former av laddning, förutsatt att elvägen byggs där den är lämplig. Investeringar i alla former av laddinfrastruktur kan möjliggöra ännu större kostnadssänkningar inom andra delar av transportsystemet.
Lågt komplementsvärde till batteri	En elväg möjliggör mer än en halvering av batterikapaciteten i fordon längs rutter som främst går längs elvägen. Mindre batteripack sänker transportkostnaden och möjliggör fler elfordon om batteriproduktion är en flaskhals. Kontinuerlig och lång elväg kan sänka den totala konsumtionstakten av batterier inom lastbilstrafiken på det svenska vägnätet med upp till 50%.
Låg utbyggnadsgrad	Redan en elvägssträckning på ett par hundra km skapar samhälls- och företagsekonomiska besparingar. Marginalbesparingen är i de flesta fall fortfarande positiv när ett 8 000 km stort vägnät elektrifierats i Sverige (inte nödvändigtvis med 100 % elektrifieringsgrad).
Kort ekonomisk livslängd	Elvägen konkurrerar ut annan publik statisk laddning där den byggs. Elväg är en konkurrenskraftig laddmetod under hela den studerade perioden 2020–2050.
Osäker lönsamhet	Den absoluta merparten av lastbilstrafiken (MGV16-HGV60) längs elvägnätet har ett företagsekonomiskt incitament att använda elvägen. Exakt andel varierar med utbyggnadsscenario och modellår, men rör sig i intervallet 60–100 %.
Irreversibel investering	Har ej studerats explicit. Alla investeringar i laddinfrastruktur hanteras som irreversibla i modellen (se även "Okompatibla elvägsteknologier"), utom löpande nätavgifter som anpassas efter efterfrågad effekt. Risken att man väljer fel teknikstandard och behöver bygga om elvägen hanteras genom att kostnaden för att bygga elväg är högre under simuleringsperiodens tidigare år.

Hållbarhetsrisk	Studiens resultat visar
Kostnadsineffektiv CO ₂ -reduktion	Total CO ₂ -reduktion styrs nästan uteslutande av hur snabbt lastbilsflottan elektrifieras. Elväg accelererar elektrifieringen, genom att fler transportuppdrag kan fullföljas med eldrift utan att batteripacken i fordonen behöver vara så stora att TCO (total cost of ownership) för elfordon blir högre än för dieselfordon.
Låg acceptans bland andra motorvägs-användare	Alla tunga lastbilsviktklasser har enligt studien företagsekonomiska incitament att använda elvägen där den byggs, med undantag för MGV16 efter 2040. Eftersom elvägsanpassade fordon har lägre TCO än andra batterielektriska fordon tvingas merparten av den tunga trafiken att nyttja elvägen av ekonomiska skäl. Nyttan av en elväg för personbilstrafik kommer att studeras i en förlängning av projektet.
Miljövänlig elproduktion	Svensk elmix är mycket miljövänlig, bland de bästa i världen. Elektrifiering av vägtransporter leder dock till minskade växthusgasutsläpp även med Polsk elmix (Le Petit, 2017).
Utsläpp från elvägskonstruktion	Växthusgasutsläppen från elvägskonstruktion är försumbara i förhållande till utsläppen från andra delar av transportsystemet (Holmgren m.fl., 2021).
Negativ landskapsbild	Har ej studerats i projektet.
Minskad trafiksäkerhet	Har ej studerats i projektet.
Marknadsrisk	Studiens resultat visar
Låg betalningsvilja	I modellen tas brukaravgifter ut för alla laddmetoder för att täcka investerings och underhållskostnader. Den kostnadseffektivaste lösningen för merparten av transportruttern är en kombination av depå- och elvägladdning, särskilt under senare modellår och särskilt i en framtid med självkörande fordon. Elväg verkar också bidra till minskad risk för störning i logistikflöden, jämfört med annan publik laddning.
Förändrade relativa bränslepriser	Besparingarna p.g.a. elektrifiering är så stora att en realistisk förändring av energikostnaden i förhållande till bränslekostnaden som mest kan fördröja elektrifieringen med några år. Elpriserna i Sverige är mycket låga och behöver mångdubblas, med bibehållna bränslepriser, för att dieseldrift ska vara företagsekonomiskt försvarbart efter att tät publik laddinfrastruktur byggts ut.
Minskad lastkapacitet	Elväg leder till ökad lastkapacitet genom en halvering av den nödvändiga batterikapaciteten per fordon (med säkerhetsmarginal) för rutten som främst går längs elvägen. Strömavtagaren väger mindre.
Låg nyttjandegrad	All lastbilstrafik har företagsekonomiska incitament att använda elvägen där den byggs. Personbilstrafik kommer att studeras i en förlängning av projektet.
Oattraktiv operatörsroll	Brukaravgifterna i modellen har satts med samma vinstmarginal för elväg som för annan publik laddinfrastruktur.
Snedvriden konkurrens för åkerier	Elvägsfordon antas kosta mindre i inköp än andra elfordon, genom att batteripacket kan vara mindre. Direkt drift från elväg minskar battericyklingen och ökar livslängden på batterier.
Ökad grad av trafikstockningar	Har ej studerats i projektet. Resultaten pekar på att all elektrifiering är kraftigt kostnadssänkande, vilket bör leda till ökad trafik.

Teknologirisk	Studiens resultat visar
Okompatibla elvägsteknologier	Denna risk kompenseras för i modellen genom ett kostnadspåslag vid tidig elvägsutbyggnad, motsvarande [sannolikhet för ombyggnation] × [kostnad för ombyggnation]. ERS orsakar ändå större kostnadsbesparingar ju tidigare den byggs, bl.a. genom snabbare elektrifiering och minskat investeringsbehov i annan publik laddinfrastruktur som senare konkurreras ut av en sent utbyggd elväg.
Otillräcklig elnätskapacitet	Totalt energi- och effektbehov påverkas främst av hur snabbt lastbilsflottan elektrifieras. En elväg sprider ut effektbehovet över större geografisk yta och medger mer flexibilitet i valet av anslutningspunkter till elnätet än annan publik laddning, men leder till accelererad elektrifiering. Andelen energi som tas ut vid depå varierar mellan ca 30–55 % för olika realistiska scenarier för laddinfrastrukturutbyggnad.
Användning begränsat till tunga fordon	Modellen tar hittills endast hänsyn till tunga fordon. Projektet har tilldelats ytterligare forskningsmedel för att även studera vilka effekter det får att erbjuda dynamisk laddning för den lätta trafiken. Tidigare forskning har visat att elväg inte är en dyrare lösning än statisk laddinfrastruktur för full elektrifiering av personbilar i Stockholms län (Rogstadius, 2021). Denna studie har visat att elväg med maximalt effektuttag i nivå med vad som stöds av konduktiva markskenor i vägbanan (vilka kan nyttjas av lätt trafik) är en av de konfigurationer som minimerar systemkostnaden för tunga vägtransporter.
Låg grad av internationell interoperabilitet	Har ej studerats explicit i projektet, men ett implicit antagande har gjorts om att laddinfrastruktur byggs ut på motsvarande vis utomlands som i Sverige.
Otillräckling volym av elvägskompatibla fordon	Har ej studerats i projektet. Sannolikt är den svenska marknaden för liten för att motivera fordonstillverkare att erbjuda speciallösningar för Sverige, vilket gör Sverige beroende av andra länders utbyggnad av infrastruktur för dynamisk laddning.
Höga överföringsförluster eller låg elvägseffekt	Överföringsförluster har inte studerats, men författaren har inte sett några indikationer på att de totala överföringsförlusterna från elnät till elmotor ska vara större med dynamisk laddning än med statisk laddning, oavsett val av teknik. Studien har visat att medeleffekten per tung lastbil inklusive gap i elvägsinfrastrukturen bör vara minst ca 150 kW. Inkludering av personbilstrafik i analysen skulle sannolikt minska effektnivån då kostnadsminimering för hela systemet kan uppnås.

Elvägen levererar ingen ström	Denna risk handlar rimligtvis om risken att bli stående längs vägen med ett elfordon med urladdat batteri. Risken för att olika typer av laddinfrastruktur ska slås ut har inte analyserats inom projektet, men modelleringsarbetet och resultaten ger ändå vissa indikationer om konsekvenserna av oplanerade driftstopp. Längs elvägar bibehålls en hög ¹² stabil laddnivå i fordonsbatterier, vilket bör leda till att ett plötsligt avbrott förhållandevis lätt kan hanteras genom omplanerad drift. Saknas dynamisk laddning längs en rutt behöver batterielektriska fordon stanna för att kunna tillföras energi. För att maximera nyttjandet av fordonet bör laddning ske vid rast, lastning eller lossning, och för att undvika onödigt höga batterikostnader bör batterier dimensioneras så att de är nästan urladdade när det är dags att ladda. Plötsliga störningar nära laddtillfället bör då bli svårare att hantera. Utöver själva laddinfrastrukturens tillförlitlighet kan störningar av statisk laddning också uppstå genom köbildning längs vägen, då förseningar kan medföra att föraren behöver ta lagstadgad rast vid en annan plats än där laddning planerats. Det är oklart hur ett trafiksystem helt beroende av statisk laddning bör utformas för att blir robust mot trafikstörningar och samtidigt minimera överkapaciteten i laddinfrastrukturen.
Omogen elvägsteknologi	I studien görs ett kostnadspåslag för elvägsinfrastruktur byggd tidiga år, motsvarande produkten av risken för att Sverige valt fel laddgränssnitt mellan väg och fordon (50 % år 2020) och merkostnaden för att bygga om elvägen till ett nytt gränssnitt (30 %) vid behov. Risken antas försvinna över tid.
Institutionell risk	Studiens resultat visar
Långdragna statliga utredningsprocesser	Snabb, tidig och vidsträckt utbyggnad av elväg skapar störst marginalnytta jämfört med elektrifiering utan elväg. Om elvägen byggs ut efter att annan laddinfrastruktur redan möjliggjort full elektrifiering är marginalnyttan nära noll m.a.p. modellerade systemkostnader. Även en sen utbyggnad kan skapa icke modellerade värden, exempelvis genom att öka den möjliga drifttiden för förarlösa fordon eller genom att minska behovet av kritiska råmaterial för batterier.
Politisk osäkerhet	Osäkerhet om framtida elvägsutbyggnad gör det mycket svårt att idag bedöma den ekonomiska livslängden på investeringar i annan publik laddinfrastruktur längs potentiella framtida elvägstråk. Byggs elväg medför det sannolikt att stora redan byggda anläggningar för publik snabbladdning konkurreras ut.
Oklart regelverk	Regelverk har studerats i annat arbetspaket inom projektet.
Ineffektiv upphandling	Upphandlingsformer har studerats i annat arbetspaket inom projektet.

¹² Med rådande batterikemier är kalenderåldring i verkligheten långsammast kring 50 % SoC, men betydligt mer komplexa laddstrategier skulle behöva implementeras i modellen för att representera ett laddbeteende där energinivån endast tillåts öka till höga nivåer strax innan fordonet lämnar elvägen. Påståendet handlar främst om att elvägar motverkar djup cykling av batterier.

4.3 Jämförelse med andra åtgärder än elektrifiering för att minska växthusgasutsläppen från vägtransporter

Resultaten i rapporten pekar på att lastbils elektrifiering i allmänhet och elvägar i synnerhet är en bra idé inom det befintliga systemet, i vilket en stor del av godstransporterna sker på väg. Inom Sverige och övriga Europa har dock överflyttning av både gods- och persontransporter till järnväg och sjöfart lyfts fram som viktiga strategier för att minska CO₂-utsläppen från transportsektorn. Andra alternativa vägar som diskuterats är användning av bio- eller elektrobränslen, användning av vätgaselektriska fordon med bränsleceller, samt en reduktion av transportarbetet.

Låt oss jämföra vilka åtgärder dessa alternativ kräver i praktiken. Antar vi för enkelhets skull att andra trafikslag är utsläppsneutrala kan vi för detta ändamål beskriva utsläppen från vägtransporter som:

$$y = x * (1 - a) * (1 - b) * c,$$

där y är mängden utsläpp, x är mängden trafik på vägarna idag, a är andelen res- och transportbehov som elimineras, b är andelen återstående trafik som flyttas över till andra trafikslag, och c är utsläppen per återstående enhet vägtrafik. För att eliminera utsläppen, det vill säga $y = 0$, krävs något av alternativen $\{a = 1, b = 1, c = 0\}$. Nöjer vi oss med 98 % utsläppsminskning, eller $y < 0,02x$, räcker det med exempelvis $(1 - a) = (1 - b) = c = 0,27$, vilket är nog så utmanande.

Politik som resulterar i mer än en halvering av både resandet och godstransporterna verkar minst sagt svår att driva igenom med dagens politiska system. COVID19-pandemin resulterade som mest (i april 2020) i en minskning av resandet i Sverige med personbil med drygt 20 % och med kollektivtrafik med ca 75 % (Viklund, 2021). Det är oklart vilka åtgärder som skulle behöva vidtas för att minska både resandet och godstransporterna mycket mer än så, men vi nöjer oss här med att anta att transporterna inte kommer att minska med mer än 10 % under den tidsperiod innan vilken växthusgasutsläppen ska ha eliminerats.

Järnväg och sjöfart är idag mer energieffektiva än vägtransporter och har idag lägre utsläpp per tonkilometer. I Sverige är nästan hela järnvägsnätet elektrifierat, men järnvägen lider också av kapacitetsbrist. Författaren har inte hittat någon källa som påstår att sjöfarten skulle vara lätt att elektrifiera, men merparten av både person- och godstransporterna på väg går ändå inte mellan platser som har en god vattenförbindelse, varför överflyttningen antas främst handla om en överflyttning till järnväg. Idag går 52 % (Pettersson, 2021) av alla godstransporter (mätt i tonkilometer) på väg, medan järnvägen står för 20 % och sjöfarten för 28 %. Gods med lägre densitet, så kallat volymgods, går ofta med lastbil, medan exempelvis malmtransporter i princip uteslutande sker med tåg och båt, vilket har betydelse då kapaciteten för järnvägsnätet är proportionerlig mot trafikarbete (km) och inte transportarbete (tonkm). Bland persontransporterna (mätt i personkilometer) går 88 % på väg medan rälsbunden trafik står för 8 %. Lastbilar står för ca en tredjedel av de totala växthusgasutsläppen från vägtrafiken i Sverige.

Om det totala transportarbetet på väg skulle halveras genom överflyttning till järnväg skulle detta innebära att förhållandet väg:järnväg för persontransporter skulle ändras från 9:1 till 4,5:5,5 och för godstransporter från ca 10:1 till 5:6 (under antagande att gods på räls idag är fyra gånger tyngre än gods på väg). En femdubbling av järnvägskapaciteten, inklusive tunnelbane- och spårvagnsnät, skulle alltså kunna ge ungefär en halvering av vägtrafiken (utan hänsyn till företagsekonomiska förhållanden). För denna överslagsberäkning antar vi en dubbling av spårtrafikens kapacitet, för både gods och persontrafik. För vägtrafiken innebär det en total minskning av trafiken och utsläppen med ca 20 %.

För att nå 98 % minskning av utsläppen från vägtrafiken med $\{a = 0,1; b = 0,2\}$ krävs $c < 0,028$, det vill säga utsläppen per tonkilometer och per personkilometer på väg behöver minska med över 97 % *trots* att järnvägens kapacitet fördubblats och transportbehovet minskats med 10 %. Biodrivmedel kan inte inom överskådlig framtid nå upp till denna nivå, oavsett om utmaningarna med produktionskostnad och tillgång går att lösa. Elektrobränslen (flytande kolväten syntetiserade med koldioxid och elektrisk energi som råvaror) kan teoretiskt nå utsläppskravet om de produceras uteslutande med energi från förnybar elproduktion, men eftersom stora energiförluster uppstår vid både syntetisering, distribution och förbränning och fordonen skulle kosta lika mycket som i modellscenariot med endast dieseldrift väljer vi att utesluta en framtid baserad på elektrobränslen med resonemanget att denna inte skulle vara ekonomiskt konkurrenskraftig jämfört med de scenarier som presenterats i denna studie. Elektrifiering genom vätgasdrivna bränsleceller i lastbilar beräknas inte kunna nå kostnadsparitet med diesel innan 2030 i något av sju andra studerade europeiska länder (Basma m.fl., 2022), vilket alltså gör att även vätgasdrift kommer att ha mycket svårt att konkurrera med direkt elektrifiering av den breda majoriteten av vägtrafiken, en slutsats som delas av andra (Plötz, 2022). I en Monte-Carlo-analys av 1000 möjliga framtidsscenarier för Europa hade vätgasdrivna lastbilar endast i ett mycket litet antal scenarier en mer än obetydlig marknadsandel och då endast efter 2045 (Craglia, 2022).

Som ytterligare jämförelse med järnväg kan ett riktmärke vara att den snabbtågsförbindelse som föreslagits mellan Göteborg och Stockholm skulle kosta ungefär lika mycket att bygga som kostnaden för att bygga all laddinfrastruktur som krävs för att elektrifiera alla lastbilstransporter i landet, varav elväg som mest utgör ca en tredjedel. Investeringskostnaden för snabbtågsförbindelsen har uppskattats till ca 200–350 miljarder kr (Andersson & Meyer, 2021) och investeringskostnaden för 6 000 km elväg med 50 % elektrifieringsgrad bör inte överskrida 60 miljarder kr. Rätt byggd skulle elvägen bidra till elektrifiering av både gods- och personbilstrafiken. Att bygga elväg är snarare kostnadsmässigt jämförbart med att elektrifiera befintlig järnväg, än med att bygga helt ny järnväg.

4.4 Påverkan från höga elpriser

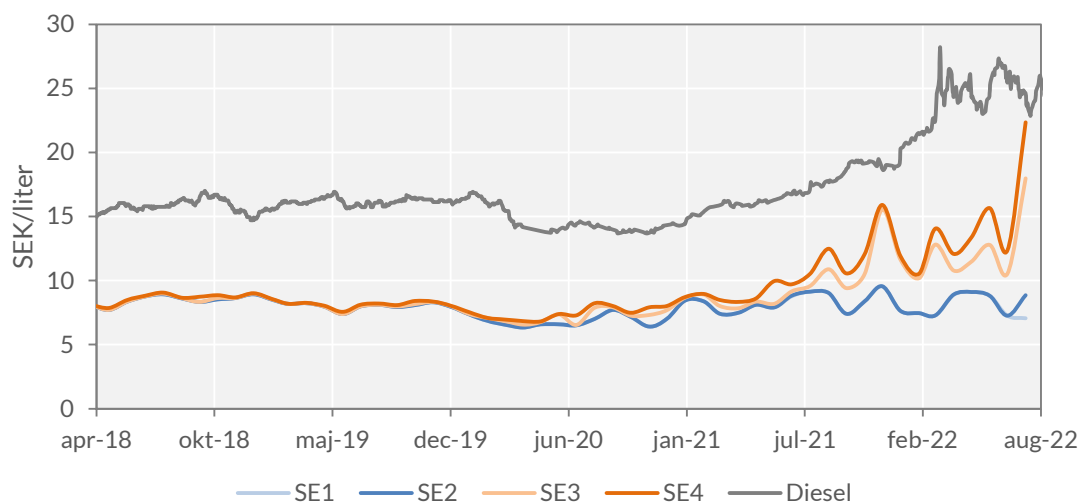
Författandet av denna rapport har föregåtts av ett år av mycket kraftig turbulens på energimarknaderna och de analyser som presenteras är baserade på antaganden om att framtida energipriser endast ökar marginellt från historiska medelvärden. Osäkerheten kring hur energipriserna kommer att utvecklas är mycket stor och eftersom historiska medelvärden använts i analysen är det värt att särskilt kommentera hur den senaste

tidens utveckling har påverkat det relativa kostnadsläget mellan dieseldrift och eldrift för tunga lastbilar.

I Figur 28 har det historiska dieselpriiset vid pump (Circle K, 2022) jämförts med det historiska elpriset (Nord Pool, 2022) plus påslag för laddinfrastruktur och nätavgifter enligt beräkningarna som använts i studien, samt historisk elskatt och moms. Antaganden som använts till figuren är en omräkningsfaktor från förbränningsmotor till elmotor om 4,2 kWh/liter, nätavgifter på 30 öre/kWh, en laddinfrastrukturkostnad på 50 öre/kWh samt elskatt på ca 36 öre/kWh. Skatterna som använts i denna beräkning motsvarar alltså dagens skattesystem, medan övriga analyser i rapporten utgått från att dagens skatteintäkter från vägtransporterna ska bibehållas. Elpriset har varierat kraftigt från dag till dag och mellan dag och natt, medan historiska medelvärden per månad använts i figuren. Laddning uteslutande dagtid skulle alltså resultera i högre elpriser än i figuren, medan laddning uteslutande nattetid skulle resultera i lägre elpriser.

Faktorer som bidragit till den senaste tidens prisökningar är en minskad import till Europa av rysk naturgas, en mycket varm sommar som ökat användningen av luftkonditionering, ökad naturgaskonsumtion i Asien och en minskad produktion av energi från kärnkraft och vattenkraft, delvis kopplade till klimatförändringar (European Council, 2022). Turbulensen på den svenska energimarknaden speglar utvecklingen på de globala marknaderna, snarare än nya inhemska förhållanden.

Utgår vi från att datapunkten för augusti 2022 är en anomali så har skillnaden i bränslekostnad för ett eldrivet och ett dieseldrivet fordon nästan fördubblats mellan juni 2020 och juni 2022, vilket alltså kraftigt förbättrar konkurrensläget för eldrivna fordon. Är datapunkten för augusti 2022 ingen anomali utan indikativ för kommande prisnivåer har bränslekostnaden i södra Sverige (SE4) för ett eldrivet fordon nu blivit lika hög som för ett dieseldrivet fordon, vilket i stället kraftigt försämrar elfordonens konkurrenskraft. För fordon som kan laddas nästan uteslutande nattetid har kostnadsfördelarna för eldrift relativt diesel ökat mycket kraftigt under 2022, särskilt i norra Sverige men även i söder. Eftersom elpriset i södra Sverige (SE3 och SE4) till stor del följer marknadspriset på fossila drivmedel och elpriset i norra Sverige (SE1 och SE2) förblivit lågt bör slutsatsen från den senaste tidens turbulens alltså vara att skenande energipriser skapar förstärkta ekonomiska incitament för transportelektrifiering. Detta gäller särskilt om transportenergin kan köpas nattetid, genom nattladdning vid depå, publikt laddade nattliga transporter eller lokala energilager.



Figur 28. Jämförelse av hur skillnaden i teoretisk bränslekostnad utvecklats till följd av stor turbulens på energimarknaderna, per energiområde.

5 Slutsatser och rekommendationer

5.1 Allmänna slutsatser om elektrifiering av tunga lastbilar

Brist på publik laddinfrastruktur förhindrar elektrifiering av lastbilar: Vid tidpunkten för publicering av denna rapport är andelen batterielektriska lastbilar under en procent av de nyregistrerade lastbilarna i landet och tillgången till laddinfrastruktur för tunga lastbilar är minst sagt bristfällig. I valideringssyfte utvärderades den simuleringsmodell som används i studien med dagens infrastrukturförutsättningar, med resultat att batterielektriska fordon endast i undantagsfall beräknades kunna erbjuda lägre driftkostnad än dieselfordon. Detta eftersom mycket stora batteripack krävs i batterielektriska fordon som endast kan laddas vid depå, vilket gör eldrift till ett dyrare alternativ än dieseldrift med 2020 års parameterantaganden.

Dagens teknik är tillräcklig för kostnadsbesparande elektrifiering av nästan all trafik med tunga lastbilar i Sverige: Simuleringsmodellen möjliggör utvärdering av andra scenarier än dagens verklighet. Simulering visar att om laddinfrastruktur för tunga lastbilar redan var väl utbyggd skulle ca 80 % av trafikarbetet med tunga lastbilar på det svenska vägnätet vara både möjligt och kostnadsbesparande att elektrifiera, med 2020 års kostnadsnivåer och grad av teknikutveckling. I simuleringsmodellen antas valet av fordonstyp endast styras av total företagsekonomisk driftkostnad, inklusive dynamiskt beräknade brukarkostnader för nyttjad laddinfrastruktur. Med de parameterantaganden som gjorts kan elektrifiering sänka de totala modellerade systemkostnaderna i hela transportsystemet (inklusive förarkostnader och värdet av växthusgasutsläpp) med upp till 17 % (modellår 2020) respektive 42 % (modellår 2050) i förhållande till dagens kostnadsnivåer. Exkluderas förarkostnader och obeskattade utsläpp är besparingspotentialen ett par procent (2020) till 39 % (2050).

Nya antaganden medför ökat värde av elektrifiering: Ett av flera modellantaganden som bidrar till att eldrift enligt denna studie är så företagsekonomiskt kostnadsbesparande är att elfordon på sikt antas ha en längre teknisk livstid än motsvarande dieselfordon. De parameterantaganden som använts i denna studie utgår från diskussioner med seniora experter inom lastbilstillverkarna Volvo och Scania. Andra studier antar vanligtvis samma livstid för batterielektriska lastbilar som för diesellastbilar, men inga belägg har hittats för detta påstående. En annan skillnad är att denna studie använder en TCO-beräkning för batterier som tar hänsyn till både teknikutveckling och beräknat slitage från laddning och urladdning givet den laddinfrastruktur som används i ett specifikt scenario, medan andra studier ofta valt att endast modellera batterikostnad baserat på det prognostiserade inköpspriset för en given batterikapacitet.

Eftersom förarkostnader efter elektrifiering utgör en större andel av de totala transportkostnaderna än med dagens dieseldrift bidrar elektrifiering direkt till att incitamenten att utveckla autonoma lastbilar förstärks. Inga antaganden har dock gjorts i kostnadsberäkningarna om varken framtida autonom drift eller ändrade trafikvolymen till följd av minskande transportkostnader eller styrmedel.

Snabb elektrifiering av vägtrafiken är nödvändig och omställningstakten styrs främst av politiska beslut: De kumulativa utsläppen av växthusgaser från lastbilstransporter på svenska vägar styrs primärt av hur snabbt övergången till elektriska fordon genomförs och sekundärt av hur stor inblandningen av biodrivmedel är i dieseln som förbränns av resterande fordon. För batterielektriska lastbilar gäller att utsläppen av växthusgaser är närmast försumbara, om fordonen laddas med Nordisk Elmix. Detta påstående gäller även om utbyggnaden av nödvändig laddinfrastruktur räknas in (Holmgren m.fl., 2021) och särskilt om även batteriproduktionen sker med lokalproducerad el.

I rapporten presenteras även slutsatsen att fullskalig elektrifiering av lastbilstransporterna är absolut nödvändig oavsett ambitionsnivå inom andra föreslagna metoder än direkt elektrifiering – biodrivmedel, överflyttning till järnväg och sjöfart, vätagasdrivna bränsleceller samt minskning av transportarbetet. När tillräcklig laddinfrastruktur väl finns på plats för att eldrift ska kunna konkurrera med dieseldrift bidrar övriga nämnda strategier endast med marginella utsläppsreduktioner utöver vad elektrifieringen redan uppnår.

Eftersom studien visar att en omställning till utsläppsfri tung lastbilstrafik redan idag skulle kunna ske på företagsekonomiska villkor är en tydlig slutsats att det som nu krävs är politisk handlingskraft, industriell samarbetsvilja och gemensamma ansträngningar för att undanröja produktionstekniska och regulatoriska flaskhalsar. Politisk oförutsägbarhet kring elvägar och minskad inblandning av biodrivmedel i fossil diesel bidrar direkt till sämre ekonomiska villkor för privata investeringar som är nödvändiga för transportsystemets ofrånkomliga omställning.

Ökad efterfrågan på energilagring och nattliga transporter: Sannolikt kommer priset på elektrisk energi att vara betydligt högre dagtid än nattetid under stora delar av den period som övergången till eldrift genomförs. Detta innebär att transporter kan genomföras till lägst kostnad när fordon laddas med energi köpt nattetid från elnätet. Stiger elpriset dagtid långt över historiska nivåer, vilket varit fallet sommaren 2022, blir dessa kostnadsskillnader stora nog att de påverkar konkurrensläget mellan olika

transportörer. Eftersom publik och semipublik¹³ laddinfrastruktur behöver tillföra ca hälften av all transportenergi i systemet för att systemkostnaden totalt ska kunna minimeras skapar elektrifiering under tider av effektbrist nya ekonomiska incitament för nattliga transporter, främst i fjärrtrafiken. Infrastrukturella lösningar för att frikoppla tidpunkten för elkonsumtion från tidpunkten för elproduktion, som batterier integrerade i elnätet och i laddinfrastruktur, kommer också att bli allt viktigare för att både skydda transportsektorn mot prischocker och lokala elavbrott. Regionala elavbrott som varar längre än ett dygn kan potentiellt slå ut alla elektrifierade transporter i regionen om lösningar för lokal energilagring saknas, vilket kan få svåra konsekvenser för samhället.

5.2 Slutsatser om elvägar och annan laddinfrastruktur

En mix av flera typer av laddinfrastruktur behövs: Ett kostnadsoptimalt elektrifierat transportsystem innehåller alla undersökta typer av laddinfrastruktur – laddning vid lastbilsdepåer och destinationer, snabbladdarstationer vid rastplatser och elvägar. Av dessa bidrar depåladdning och elvägar tillsammans med den absoluta merparten av all laddning. För att uppnå mer än 90 % elektrifiering av trafikarbetet med lastbil på det svenska vägnätet krävs 1) både mycket storskalig utbyggnad av elväg och god tillgång till kompletterande statisk laddinfrastruktur, eller 2) redan föreslagen utbyggnad av elvägar samt mycket god tillgång till statisk laddinfrastruktur. Publik snabbladdning vid många fler platser än de som rekommenderats i tidigare forskning skulle eventuellt kunna vara ett praktiskt alternativ till elvägar, men med högre kostnad, långsammare elektrifiering och högre kumulativa växthusgasutsläpp som följd. Utbyggnad av elvägar medför att det inte längre finns behov av (eller ekonomiska förutsättningar att driva) publika snabbladdarstationer på flera MW per anläggning längs samma vägsträckor.

I en framtid med autonoma fordon och längre drifttid per dygn minskar möjligheterna att ladda kostnadseffektivt vid depå och vid rastplatser. Både autonoma fordon och fordon som nyttjas i flerskift medför ökad efterfrågan på laddning via elväg och vid destination, i förhållande till simuleringsresultaten som presenteras i rapporten.

Snabbladdarstationer behövs, men anläggningar på flera MW konkurreras snabbt ut av elvägar: Modellering av starka interaktionseffekter i systemet visade att tidigt utbyggda stora snabbladdarstationer (total anläggningseffekt betydligt över 1 MW) längs större motorvägar lätt konkurreras ut om elväg byggs ut i närområdet. I kombination med elvägar bidrar många mindre snabbladdarstationer (<1 MW anläggningseffekt) till en ökad grad av transportelektrifiering och en reduktion av den totala systemkostnaden. På grund av komplex systemdynamik har det varit mycket svårt att identifiera exakt varför god tillgång till publik snabbladdning är kostnadssänkande samtidigt som laddmetoden lätt konkurreras ut, men författarens hypotes är att snabbladdning är ett mycket kraftfullt sätt att öka flexibiliteten i hur det övriga systemet kan utformas, vilket i sin tur möjliggör större besparingar i andra delsystem.

¹³ Publik laddinfrastruktur är fri att användas av alla. I modellen utgör snabbladdarstationer vid rastplatser och elvägar publika laddmöjligheter. Semipublik laddinfrastruktur är fri att använda för många olika aktörer som har rätt att besöka platsen. I modellen utgörs detta av destinationsladdning.

Det är uppenbart från experimenten att endast utbyggnad av stora snabbladdarstationer längs de större vägarna inte är tillräckligt för att elektrifiera den tunga lastbilstrafiken i närtid. Utan elvägar krävs tillgång till laddning både vid depå, destination och längs väg, för merparten av den tunga trafiken.

Elvägar sänker transportkostnaden genom ca 70 % reducerat batteribehov och nyttjas därför av 60–100 % av den tunga trafiken: Med den internationella mått mätt låga trafiktäthet som finns på det svenska vägnätet kan elvägar inte erbjuda signifikant lägre laddkostnad än andra former av laddinfrastruktur, åtminstone inte om infrastrukturen nyttjas endast av tunga lastbilar. Trots detta visar experimenten att en elväg kommer att nyttjas av 60–100 % av den tunga trafiken på sträckor där tekniken installeras, där andelen påverkas av plats, år och grad av utbyggnad av annan laddinfrastruktur. Parallell forskning som med andra metoder undersökt elvägars marknadsandel under en stor spridning av möjliga framtida förutsättningar i Europa identifierade ett liknande intervall och att detta intervall är mycket robust mot variationer i parameterantaganden, särskilt efter år 2040 (Craglia, 2022).

Längs rutter där elväg erbjuds är det möjligt att genomföra transporter med batterielektriska fordon utrustade med ca 70 % mindre batterikapacitet, vilket bidrar till kostnadsfördelar mot annan elektrisk drift i paritet med dagens vinstmarginaler i åkeribranschen. Tidigare forskning som med mindre hänsyn till komplex systemdynamik analyserat graden av batterikapacitetsreduktion som elvägar medför har rapporterat resultat mellan 50 % och 75 %, för både lastbilar och personbilar. Där elvägar möjliggör transporter med mindre batteripack når batterielektriska fordon även prisparitet mot diesel tidigare än i scenarier där elväg saknas. Experimenten visar att alla klasser av tunga lastbilar nyttjar en elväg över hela den studerade tidsperioden (2020–2050). HGV40, där främst fjärrtransporter ingår, är den lastbilsklass som gagnas mest av tillgång till elvägar.

Kostnadsfördelarna med elvägsanpassade fordon på elvägsutrustade sträckor är så stora att åkare vars fordon trafikerar sådana sträckor sannolikt kommer att tvingas elvägsanpassa sina lastbilar för att kunna erbjuda konkurrenskraftiga priser på sina tjänster. I de fall dagens fordon trafikerar olika rutter varav endast vissa i framtiden erbjuder elväg bör dessa transporter i framtiden allokeras om, så att främst fordon anpassade för elvägen också kör på elvägen, och omvänt.

Beslut om elvägar kan tas oberoende av annan laddinfrastruktur: Studiens kanske viktigaste resultat är att utformningen av ett nationellt elvägnät inte behöver ta hänsyn till den framtida tillgången på annan laddinfrastruktur. Genom simulering av över 500 scenarier visar studien att den mest kostnadsbesparande elvägen på det svenska vägnätet (när endast tunga lastbilar räknas med) alltid täcker ett ca 4 000 km stort vägnät (dubbelriktad väg), med en medeleffekt inklusive gap på minst 150 kW. Avsnitt 3.3 innehåller figurer som kan användas för att skatta marginalvärdet på en elvägsinvestering, givet antaganden om utbyggnad av annan laddinfrastruktur. Som mest kan en elväg bidra med en total sänkning av den modellerade systemkostnaden för tunga vägtransporter med 25 %, inklusive kostnaden för elvägen. Att inte bygga någon elväg alls är alltid det sämsta alternativet, för alla utvärderade scenarier för statisk laddinfrastruktur.

Om batteritillgång blir en flaskhals som fördröjer elektrifieringstakten är rekommendationen att bygga en kontinuerlig elväg utan gap som är anpassad för både

lastbilar och personbilar. Anledningen är att en lång kontinuerlig elväg leder till en halvering av den nationella konsumtionstakten av fordonsbatterier, relativt elektrifiering helt utan elväg. Kostnadsattraktiviteten av elväg för personbilar har inte undersökts i denna studie, men tidigare forskning har visat att elektrifiering av Stockholms läns personbilstrafik med hjälp av elvägar sannolikt skulle kunna ske till samma eller lägre kostnad jämfört med elektrifiering uteslutande med hjälp av statisk laddinfrastruktur (Rogstadius, 2021).

För laddning av endast tunga lastbilar rekommenderas elväg med konduktiv skena eller luftledning, men lätt trafik bör inkluderas: Rankningen av elvägskonfigurationer resulterade inte i några skillnader i total systemkostnad för konfigurationer med en medeleffekt över 150 kW per fordon. Bland de olika konkurrerande elvägsteknikerna kan konduktiv skena och konduktiv luftledning leverera denna effektnivå – författaren känner inte till någon induktiv teknik för dynamisk laddning som klarar att leverera effekter över ca 100 kW per fordon.

Ska studien användas som underlag för att välja elvägsteknik är det dock mycket viktigt att ha i åtanke att endast trafik med tunga lastbilar modellerats. Inkludering av lättare fordon i analysen skulle påverka rankningen om laddning via elväg är en konkurrenskraftig lösning även för den lättare trafiken. En tidigare studie som mestadels använde samma parameterantaganden, och därför har direkt jämförbara resultat, pekade på att den utjämnade infrastrukturkostnaden för statisk laddning för personbilar som lägst kan nå nivåer kring 0,4 SEK/kWh (Rogstadius, 2021). I den nu presenterade analysen har den utjämnade infrastrukturkostnaden för elvägar beräknats till 0,025–0,10 €/kWh, beroende på elvägnätets storlek och under antagande om att hela infrastrukturkostnaden bärs av den tunga lastbilstrafiken.

Personbilar, lätta lastbilar och bussar står tillsammans för knappt 80 % av växthusgasutsläppen (och energiförbrukningen) från vägtrafiken i Sverige. Om 10 % av energin konsumerad av dessa fordonstyper skulle levereras från samma elvägsinfrastruktur som de tunga lastbilarna använder skulle den totala levererade energin från elvägen dubblas. Infrastrukturkostnaden per kWh skulle då minska, vilket skulle öka elvägens konkurrenskraft ytterligare jämfört med statisk laddning av tunga lastbilar. Sannolikt skulle brukarkostnaden hamna i nivå med eller under kostnaden för de billigaste infrastrukturalternativen som tidigare identifierats för personbilar.

Kostnaden för själva laddinfrastrukturen är dock redan så låg att den totala brukarkostnaden domineras av elhandel och skatter, vilket innebär att frågan som behöver besvaras är om elvägladdning är attraktivt för lätt trafik ur andra hänseenden än kostnad, eller om stationär laddning är att föredra. Flera fördelar med dynamisk laddning presenterades i (Rogstadius, 2021) och författaren bedömer det som sannolikt att en tillräckligt stor andel av den lätta trafiken skulle nyttja en elväg för att beslut om elvägsteknik bör beakta dessas intressen såväl som den tunga trafikens.

Denna studie kan inte ge svar på om induktiv elvägsteknik skulle vara det bästa alternativet om all vägtrafik räknas med som potentiella brukare.

Större vägar inne i större städer bör tidigt ingå som en del av det vägnät där elvägar byggs ut, även om elvägen endast har stöd för tunga lastbilar.

Offentlig sektors otydlighet kring elvägsutbyggnad håller tillbaka privata

initiativ: Att elvägar visat sig vara okänsliga för konkurrens från annan laddinfrastruktur innebär inte det omvända. Statisk laddinfrastruktur, i synnerhet publik snabbladdning, är känslig för konkurrens från elvägar och behöver planeras utifrån antaganden om var och när elvägar kommer att vara tillgängliga. Under antagande att endast offentlig sektor kommer att stå för utbyggnaden av elvägar är det av mycket stor vikt att långsiktigt tillförlitliga beslut i frågan fattas snarast. Privat sektor förväntas stå för i princip alla övriga investeringar som krävs för en omställning till ett CO₂-neutralt vägtransportsystem och privata investerare i både laddinfrastruktur, fordonsutveckling och fordon tar en stor ekonomisk risk om de investerar innan beslut tagits om eventuell elvägsinstallation.

Det är sannolikt möjligt att, på sikt och i en lägre takt än om elväg byggs, elektrifiera merparten av den tunga trafiken uteslutande med hjälp av infrastruktur för statisk laddning. Denna infrastruktur kommer inte att vara lika väl anpassad till behoven från autonoma lastbilstransporter och kommer med stor sannolikhet att konkurreras ut om staten i ett senare skede trots allt tar beslut om utbyggnad av elvägar.

Så länge inget slutgiltigt beslut om elvägsutbyggnad tagits behöver privata investerare i både statisk laddinfrastruktur och elektriska lastbilar räkna in risken för förändrade förutsättningar i sina ekonomiska kalkyler. Konsekvensen för denna risk är stor och medför att många investeringar inte når tillräcklig lönsamhet, med följd att omställningen fördröjs.

6 Projektfinansiering och stöd

Denna studie är en del av projektet Genomförbarhetsstudie elvägpilot E22, finansierat av Europeiska regionala utvecklingsfonden och Region Blekinge.

Flera privata företag har bidragit med kunskap kring förväntade framtida prisbilder och förväntade tekniska prestanda. Ingen part med egna ekonomiska särintressen har deltagit i utformningen av studiens forskningsfrågor, experiment eller slutsatser.

Författaren vill särskilt tacka följande personer och organisationer för deras bidrag till forskningen i form av domänkunskap, problemlösande och ifrågasättande av resultat:

Hampus Alfredsson (RISE),
 Magdalena Borgbrant (RISE),
 Martin Kjellin (RISE),
 Martin Joborn (RISE),
 Henrik Sällberg (BTH),
 Nils-Gunnar Vågstedt (Scania),
 Clément Chartier (Scania),
 Anders Berger (Volvo Group),
 Roger Blom (f.d. VD Ernsts Express),
 Patrik Åkerman (Siemens),
 Karin Ebbinghaus (Elonroad),
 Håkan Sundelin (Electreon),
 Björn Sandström (Ellevio),
 Anders Bülund (Trafikverket),

Oscar Morén (ChargeNode),
 Kristian Sandahl (ChargeNode),
 Mika Kanninen (Akkurate)
 Battery University (<http://www.batteryuniversity.com>).

7 Källor

- Alfredsson, H., & Rogstadius, J. (2022). *Ruttbaserade simulerade trafikdata för högupplöst analys av tunga godstransporter på det svenska vägnätet* (2022:112; RISE Rapport). RISE Research Institutes of Sweden AB.
- Andersson, E.-L., & Meyer, F. (2021). *Nya stambanor för höghastighetståg: Slutredovisning av uppdragangående nya stambanor för höghastighetståg*. Trafikverket. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:trafikverket:diva-4529>
- Basma, H., Zhou, Y., & Rodriguez, F. (2022). *Fuel-cell hydrogen long-haul trucks in Europe: A total cost of ownership analysis*. International Council on Clean Transportation. <http://theicct.org/publication/eu-hvs-fuels-evs-fuel-cell-hdvs-europe-sep22>
- Börjesson, M., Johansson, M., & Kågeson, P. (2021). The economics of electric roads. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 125, 102990. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.102990>
- Circle K. (2022). *Drivmedelspriser—Bensinpriser & dieselpriiser*. <https://www.circlek.se/drivmedel/drivmedelspriser>
- Connolly, D. (2017). Economic viability of electric roads compared to oil and batteries for all forms of road transport. *Energy Strategy Reviews*, 18, 235–249. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2017.09.005>
- Craglia, M. (2022). *Decarbonising Europe's Trucks: How to Minimise Cost Uncertainty* (Case-Specific Policy Analysis) [Text]. <https://www.itf-oecd.org/decarbonising-europes-trucks-minimise-cost-uncertainty>
- de Saxe, C., Ainalis, D., Miles, J., Greening, P., Gripton, A., Thorne, C., & Cebon, D. (2022). *An Electric Road System or Big Batteries: Implications for UK Road Freight* (SSRN Scholarly Paper Nr 4194379). <https://doi.org/10.2139/ssrn.4194379>
- Dieselskatt. (2022). Ekonomifakta. <https://www.ekonomifakta.se/Fakta/Energi/Styrmedel/Konsumtionsskatter-pa-diesel/>
- European Council. (2022, september 12). *Energy prices and security of supply*. <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/energy-prices-and-security-of-supply/>
- European Environment Agency. (2022, juli 14). *Greenhouse gas emission intensity of electricity generation in Europe*. <https://www.eea.europa.eu/ims/greenhouse-gas-emission-intensity-of-1>
- Gustavsson, M. G. H., Hacker, F., & Helms, H. (2019). *Overview of ERS concepts and complementary technologies*. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ri:diva-38294>
- Holmgren, K., Takman, J., Vierth, I., Heyne, S., Ekström, M., Fröberg, M., Johansson, M., Karlsson, P.-A., & Petrén, O. (2021). *KNOGA. Fossilfri framdrift för tunga långväga transporter på väg: Kostnadsfördelning och risker för olika aktörer*. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:vti:diva-16183>

- Holmquist, C. (2020). *Åkerinäringen med verksamhetsområden—Nyckeltal för lönsamhet och tillväxt 1999-2019*. Rementum. https://www.akeri.se/sites/default/files/2020-09/Nyckeltalsrapport_2020.pdf
- Ivansson, P., Werner, C., & Bengtsson, J. (2006). *Kraftkabelförläggning i mark: - En studie av produktionsmetoder*. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:vxu:diva-955>
- Jämför företagslån. (2018, december 8). *Firmalån.com*. <https://firmalan.com/sv/lana-pengar/jamfor-lan/>
- Karlström, M. (2020). *Kunskapssammanställning stationär laddning till tunga lastbilar* (s. 15).
- Le Petit, Y. (2017, oktober 26). *Electric cars emit less CO2 over their lifetime than diesels even when powered with dirtiest electricity – study*. Transport & Environment. <https://www.transportenvironment.org/discover/electric-cars-emit-less-co2-over-their-lifetime-diesels-even-when-powered-dirtiest-electricity/>
- Lindgren, M., Asp, T., Grudemo, S., Hasselgren, B., Mörtzell, H., Natanaelsson, K., Näsström, E., & Palo, K. (2021). *Behov av laddinfrastruktur för snabbbladdning av tunga fordon längs större vägar* (2021:012; s. 110). Trafikverket.
- Melkersson, M. (2021). *Körsträckor 2020*. Trafikanalys. <https://www.trafa.se/globalassets/statistik/vagtrafik/korstrackor/2020/korstrackor-2020---2021-09-22.pdf>
- Morfeldt, J., Shoman, W., Johansson, D. J. A., Yeh, S., & Karlsson, S. (2022). If Electric Cars Are Good for Reducing Emissions, They Could Be Even Better with Electric Roads. *Environmental Science & Technology*, 56(13), 9593–9603. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c00018>
- Natanaelsson, K., Lindgren, M., Rydén, E., Hasselgren, B., Palo, K., & Grudemo, S. (2021). *Analysera förutsättningar och planera för utbyggnad av elvägar* (2021:013; Trafikverkets publikationer). Trafikverket. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:trafikverket:diva-4498>
- Naturvårdsverket. (2022). *Inrikes transporter, utsläpp av växthusgaser*. <https://www.naturvardsverket.se/data-och-statistik/klimat/vaxthusgaser-utslapp-fran-inrikes-transporter/>
- Nord Pool. (2022). *See all weekly day-ahead prices*. <https://www.nordpoolgroup.com/en/Market-data1/Dayahead/Area-Prices/ALL1/Monthly/>
- Perdu, F., & Chaniot, P. (2021). *Système de route électrique: Décarboner le transport routier de marchandise par l'ERS, enjeux et stratégie. Annexe 1.1 bis: Optimisation de la longueur de route à équiper*. Ministère de la Transition énergétique. <https://www.ecologie.gouv.fr/lautoroute-electrique>
- Petterson, H. (2021). *Transportarbete i Sverige 2000–2020*. Trafikanalys. <https://www.trafa.se/globalassets/statistik/transportarbete/transportarbete-2000-2020-2021-10-04.pdf>
- Plötz, P. (2022). Hydrogen technology is unlikely to play a major role in sustainable road transport. *Nature Electronics*, 5(1), Art. 1. <https://doi.org/10.1038/s41928-021-00706-6>
- Plötz, P., & Speth, D. (2021). *Truck Stop Locations in Europe* (s. 33). Fraunhofer ISI. https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2021/ACEA_truckstop_report_update.pdf

- Power Circle. (2021). *Elektrifiering och laddning av tunga transporter: Faktablad från Power Circle*. <https://powercircle.org/elektrifieradlastbilar.pdf>
- Redondo-Iglesias, E., Venet, P., & Pelissier, S. (2018). Calendar and cycling ageing combination of batteries in electric vehicles. *Microelectronics Reliability*, 88–90, 1212–1215. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2018.06.113>
- Regeringskansliet. (2017, september 20). *Mål för transportpolitiken* [Text]. <https://www.regeringen.se/regeringens-politik/transporter-och-infrastruktur/mal-for-transporter-och-infrastruktur/>
- Regeringskansliet, R. och. (2022, oktober 18). *Regeringsförklaringen den 18 oktober 2022* [Text]. Regeringskansliet; Regeringen och Regeringskansliet. <https://doi.org/10/regeringsforklaringen-den-18-oktober-2022/>
- Riksgälden. (2022). *Statslåneräntan—Riksgälden.se* [Text]. Riksgälden. <http://www.riksgalden.se/sv/var-verksamhet/statslanerantan/>
- Rogstadius, J. (2021). *Recommendations for Charging Infrastructure in Stockholm County: Targeting Full Electrification of Passenger Cars by 2030*. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ri:diva-57521>
- Sandgren, A., & Nilsson, J. (2021). *Emissionsfaktorer för nordiskelmix med hänsyn till import och export* (text Nr C619). <https://www.ivl.se/publikationer/publikationer/emissionsfaktorer-for-nordiskelmix-med-hansyn-till-import-och-export.html>
- Shoman, W., Karlsson, S., & Yeh, S. (2021). *Benefits of Including Battery Electric Cars in Electric Road Systems: Battery and infrastructure savings*. <https://research.chalmers.se/en/publication/523472>
- Statens energimyndighet. (2020). *Drivmedel 2019: Redovisning av rapporterade uppgifter enligt drivmedelslagen, hållbarhetslagen och reduktionsplikten* (2020:26; ER). https://www.energimyndigheten.se/globalassets/nyheter/2020/er-2020_26-drivmedel-2019.pdf
- Sveriges Miljömål. (2022, mars 31). *Utsläpp av växthusgaser från inrikes transporter*. <https://www.sverigesmiljomal.se/etappmalen/utslapp-av-vaxthusgaser-fran-inrikes-transporter/>
- Sällberg, H., & Numminen, E. (2022). *Risikanalys elvägsinförande, GFS-rapport*.
- Tan, Z., Liu, F., Chan, H. K., & Gao, H. O. (2022). Transportation systems management considering dynamic wireless charging electric vehicles: Review and prospects. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 163, 102761. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2022.102761>
- Trafikverket. (2017). *Analysera och prognosticera godstrafik: Samgodsmodellen förklarad på ett enklare sätt*. Trafikverket. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:trafikverket:diva-3804>
- Trafikverket. (2020, juni 15). *Analysmetod och samhällsekonomiska kalkylvärden för transportsektorn: ASEK 7.0: Kapitel 14 Operativa trafikeringsekostnader för godstransporter*. <https://bransch.trafikverket.se/for-dig-i-branschen/Planera-och-utreda/Planerings--och-analysmetoder/Samhallsekonomisk-analys-och-trafikanalys/gallande-forutsattningar-och-indata/>
- Viklund, M. (2021). *Transporter och resande i en postpandemisk värld – trender och mottrender* (PM 2021:4). Trafikanalys. https://www.trafa.se/globalassets/pm/2021/pm2021_4-transporter-och-resande-i-en-postpandemisk-varld---trender-och-mottrender.pdf

- Wallberg, J. (2021). *Riskpremien på den svenska aktiemarknaden*. PwC.
<https://www.pwc.se/sv/pdf-reports/corporate-finance/riskpremiestudien-2021.pdf>
- Wikipedia authors. (2022). Complex system. I *Wikipedia*.
https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Complex_system&oldid=1106795325
- Årsmedelspriser motorbränslen. (2022). *Drivkraft Sverige*.
<https://drivkraftsverige.se/statistik/priser/mer-prisstatistik/arsmedelspriser-motorbranslen/>

Through our international collaboration programmes with academia, industry, and the public sector, we ensure the competitiveness of the Swedish business community on an international level and contribute to a sustainable society. Our 2,800 employees support and promote all manner of innovative processes, and our roughly 100 testbeds and demonstration facilities are instrumental in developing the futureproofing of products, technologies, and services. RISE Research Institutes of Sweden is fully owned by the Swedish state.

I internationell samverkan med akademi, näringsliv och offentlig sektor bidrar vi till ett konkurrenskraftigt näringsliv och ett hållbart samhälle. RISE 2 800 medarbetare driver och stöder alla typer av innovationsprocesser. Vi erbjuder ett 100-tal test- och demonstrationsmiljöer för framtidssäkra produkter, tekniker och tjänster. RISE Research Institutes of Sweden ägs av svenska staten.



RISE Research Institutes of Sweden AB
Box 857, 501 15 BORÅS
Telefon: 010-516 50 00
E-post: info@ri.se, Internet: www.ri.se

Systems Engineering
RISE Rapport 2022:110,
version 2022-11-24
ISBN:

8 Bilaga A: Parameterantaganden

I efterföljande tabeller listas de parametervärden som använts i studien. Värden i gråmarkerade tabellceller är beräknade utifrån andra angivna värden, vanligtvis genom framräkning i tid enligt för variabeln angiven årlig förändringstakt.

Källor anges per sektion, inte per variabel, eftersom de flesta värden för år 2020 är baserade på medelvärdesbildning av flera källor eller justeringar av en domänexpert. Årlig förändringstakt är i nästan alla fall en gissning baserad på författarens eller annan relevant experts domänkunskap.

8.1 Batterier

Fordonsbatterier (med dagens batterikemier) slits snabbare och har betydligt sämre tekniska prestanda när de är nästan helt urladdade eller nästan helt fulladdade. Därför tillämpas ett så kallat state-of-charge-fönster (SoC-fönster) som döljer delar av energinivåintervallet, med följd att den användbara kapaciteten i ett batteripack (nettokapacitet) kan vara mindre än den totala kapacitet som installerats i fordonet (bruttokapacitet). Parametervärden nedan är brutto och räknas vid behov om till nettovärden i modellen.

Många av parametrarna är sammanlänkade genom val av batterikemi och avvägningar görs alltid för att optimera ett batteripacks totala uppsättning tekniska egenskaper. Antaganden om batteriutveckling är därför baserade på flera experters förväntningar om hur dessa parametrar kommer att utvecklas tillsammans.

En stor andel av lastbilarna som trafikerar det svenska vägnätet är tillverkade i Sverige. CO₂-utsläpp från batteriproduktion minskar kraftigt över tid, enligt uppgifter om att utsläppen främst kommer från elförbrukning i produktionsstadiet samt ett antagande om att en allt större andel av batteritillverkningen sker i Sverige.

Källor: Battery University, BNEF, Clément Chartier (Scania), öppet inbjudna kommentarer på LinkedIn, NorthVolt, Wikipedia.

Variable	Unit	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	Annual change
SoC window	ratio	0.65	0.68	0.72	0.75	0.79	0.83	0.88	1%
Calendar lifetime	years	15	17	18	20	21	23	24	0.3

Variable	Unit	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	Annual change
Cycle lifetime	cycles	1 500	2 104	2 951	4 139	5 805	8 141	11 418	7%
Reference charging rate	c	1.00	1.22	1.48	1.80	2.19	2.67	3.24	4%
Reference discharging rate	c	1.50	1.82	2.22	2.70	3.29	4.00	4.87	4%
Max permitted charging rate	c	1.50	1.82	2.22	2.70	3.29	4.00	4.87	0%
Max permitted discharging rate	c	2.25	2.74	3.33	4.05	4.93	6.00	7.30	0%
Specific energy	kWh per kg	0.20	0.23	0.27	0.31	0.36	0.42	0.49	3%
Energy density	kWh per liter	0.50	0.58	0.67	0.78	0.90	1.05	1.21	3%
Pack cost	€ per kWh	160	124	96	74	57	44	34	-5%
Residual value if recycled this year	ratio of purchase price	0%	1%	5%	15%	25%	29%	30%	0%
Production emissions	kg CO ₂ per kWh	150	99	65	43	28	19	12	-8%
End of life definition	ratio of gross	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	0%

8.2 Drivlinor

Källor: (Lindgren m.fl., 2021) med justeringar av Nils-Gunnar Vågstedt (Scania).

Variable	Unit	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	Annual change
Cost of replaced ICE powertrain	SEK/truck	500	526	552	580	610	641	674	1%
Cost of replaced ICE powertrain	SEK/kW	650	683	718	755	793	834	876	1%
Cost of new EV powertrain	SEK/truck	40 000	36 157	32 683	29 543	26 704	24 139	21 819	-2%
Cost of new EV powertrain	SEK/kW	190	172	155	140	127	115	104	-2%

Variable	Unit	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	Annual change
Vehicle OEM markup	%	48%	48%	48%	48%	48%	48%	48%	0%
ICE weight to power ratio	kg/kW	8.03	8.03	8.03	8.03	8.03	8.03	8.03	0%
BEV weight to power ratio	kg/kW	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	0%

8.2.1 Prisskillnad, batterielektrisk lastbil jämfört med diesel, exklusive batteripack (EUR)

Vehicle class	Engine power (kW)	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
HGV60	750	-43 405	-49 434	-55 403	-61 345	-67 291	-73 270	-79 309
HGV40	550	-30 334	-34 901	-39 411	-43 889	-48 358	-52 841	-57 359
MGV24	300	-13 995	-16 736	-19 422	-22 069	-24 692	-27 305	-29 921
MGV16	160	-4 845	-6 563	-8 228	-9 850	-11 439	-13 005	-14 556

8.2.2 Viktskillnad, batterielektrisk lastbil jämfört med diesel, exklusive batteripack (kg)

Vehicle class	Motor power (kW)	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
HGV60	750	-5 220	-5 220	-5 220	-5 220	-5 220	-5 220	-5 220
HGV40	550	-3 828	-3 828	-3 828	-3 828	-3 828	-3 828	-3 828
MGV24	300	-2 088	-2 088	-2 088	-2 088	-2 088	-2 088	-2 088
MGV16	160	-1 114	-1 114	-1 114	-1 114	-1 114	-1 114	-1 114

8.2.3 Diesellastbil, prisskillnad mot år 2020

Vehicle class	Engine power (kW)	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
HGV60	750	0	3 537	7 254	11 161	15 267	19 582	24 118
HGV40	550	0	2 595	5 322	8 188	11 200	14 366	17 693
MGV24	300	0	1 417	2 906	4 471	6 116	7 845	9 662
MGV16	160	0	757	1 553	2 390	3 269	4 193	5 165

8.3 Fordon

Källor: (Trafikverket, 2020), Nils-Gunnar Vågstedt (Scania), Anders Berger (Volvo Group), Roger Blom (f.d. VD Ernsts Express), egen erfarenhet.

Group	Variable	Unit	HGV60	HGV40	MGV24	MGV16	Annual change
Common	Annual distance	km	90 000	115 000	80 000	42 000	0%
Common	Utilization	calendar days per year	230	230	230	230	0%
Common	Utilization	h per day	10	12	9	9	0%
Common	Power, peak	kW	750	550	300	160	0%
Common	Tyres	euro per km	0.113	0.090	0.061	0.031	0%
Common	Cargo capacity value	euro per ton-km	0.025	0.025	0.035	0.05	0%
Common	Cargo capacity value	euro per m ³ -km	0.007	0.007	0.0098	0.014	0%
Common	Total weight limit	kg	60 000	40 000	24 000	16 000	0%
Common	Depot stop	h	14	12	15	15	0%
Common	Destination stop	h	1	0.6	0.25	0.1	0%
Common	Rest stop	h	0.75	0.75	0.75	0.75	0%
Common	Drive session	h	4.5	4.5	4.5	4.5	0%
Common	Driver cost	euro per h	34	34	24	24	0%
ICEV	Chassis weight	kg	23 000	20 000	10 000	5 000	0%

Group	Variable	Unit	HGV60	HGV40	MGV24	MGV16	Annual change
ICEV	Chassis cost, 2020	euro	259 200	235 200	148 800	91 200	0%
ICEV	Lifetime	years	10	10	7	7	0%
ICEV	Maintenance cost	euro per km	0.10	0.11	0.12	0.10	0%
ICEV	Residual value at end of life	ratio	0.09	0.09	0.09	0.09	0%
ICEV	Fuel consumption	liter per km	0.35	0.27	0.22	0.16	-1%
BEV	Maintenance cost	euro per km	0.040	0.046	0.048	0.041	0%
BEV	Residual value at end of life	ratio	0.09	0.09	0.09	0.09	0%
BEV	Energy consumption	kWh per km	1.46	1.12	0.64	0.47	-1%
BEV	Min range buffer	km	50	50	30	20	0%

8.3.1 MGV16

Subgroup	Variable	Unit	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Common	Annual distance	km	42 000	42 000	42 000	42 000	42 000	42 000	42 000
Common	Utilization	calendar days per year	230	230	230	230	230	230	230
Common	Utilization	h per day	9	9	9	9	9	9	9
Common	Power, peak	kW	160	160	160	160	160	160	160
Common	Tyres	euro per km	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Common	Cargo capacity value	euro per ton-km	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Common	Cargo capacity value	euro per m3-km	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014
Common	Total weight limit	kg	16 000	16 000	16 000	16 000	16 000	16 000	16 000
Common	Depot stop	h	15	15	15	15	15	15	15
Common	Destination stop	h	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Common	Rest stop	h	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75

Subgroup	Variable	Unit	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Common	Drive session	h	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
Common	Driver cost	euro per h	24	24	24	24	24	24	24
ICEV	Chassis weight	kg	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000
ICEV	Chassis cost, 2020	euro	91 200	91 200	91 200	91 200	91 200	91 200	91 200
ICEV	Lifetime	years	7	7	7	7	7	7	7
ICEV	Maintenance cost	euro per km	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
ICEV	Residual value at end of life	ratio	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
ICEV	Fuel consumption	liter per km	0.16	0.16	0.15	0.15	0.14	0.14	0.14
BEV	Maintenance cost	euro per km	0.041	0.041	0.041	0.041	0.041	0.041	0.041
BEV	Residual value at end of life	ratio	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
BEV	Energy consumption	kWh per km	0.47	0.44	0.42	0.40	0.38	0.36	0.34
BEV	Min range buffer	km	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
BEV	Lifetime	years	7.0	8.7	10.3	12.0	12.0	12.0	12.0
ICEV	Chassis cost	euro	91 200	91 957	92 753	93 590	94 469	95 393	96 365
BEV	Chassis weight, excl battery	kg	3 886	3 886	3 886	3 886	3 886	3 886	3 886
BEV	Chassis cost, excl battery	euro	86 355	85 394	84 525	83 740	83 030	82 389	81 809
BEV	Min net battery capacity	kWh	46	40	34	30	26	22	19

8.3.2 MGV24

Subgroup	Variable	Unit	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Common	Annual distance	km	80 000	80 000	80 000	80 000	80 000	80 000	80 000
Common	Utilization	calendar days per year	230	230	230	230	230	230	230
Common	Utilization	h per day	9	9	9	9	9	9	9
Common	Power, peak	kW	300	300	300	300	300	300	300

Subgroup	Variable	Unit	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Common	Tyres	euro per km	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
Common	Cargo capacity value	euro per ton-km	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035
Common	Cargo capacity value	euro per m3-km	0.0098	0.0098	0.0098	0.0098	0.0098	0.0098	0.0098
Common	Total weight limit	kg	24 000	24 000	24 000	24 000	24 000	24 000	24 000
Common	Depot stop	h	15	15	15	15	15	15	15
Common	Destination stop	h	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Common	Rest stop	h	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
Common	Drive session	h	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
Common	Driver cost	euro per h	24	24	24	24	24	24	24
ICEV	Chassis weight	kg	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000
ICEV	Chassis cost, 2020	euro	148 800	148 800	148 800	148 800	148 800	148 800	148 800
ICEV	Lifetime	years	7	7	7	7	7	7	7
ICEV	Maintenance cost	euro per km	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
ICEV	Residual value at end of life	ratio	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
ICEV	Fuel consumption	liter per km	0.22	0.21	0.21	0.20	0.20	0.19	0.19
BEV	Maintenance cost	euro per km	0.048	0.048	0.048	0.048	0.048	0.048	0.048
BEV	Residual value at end of life	ratio	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
BEV	Energy consumption	kWh per km	0.64	0.61	0.58	0.55	0.52	0.50	0.47
BEV	Min range buffer	km	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0
BEV	Lifetime	years	7.0	8.7	10.3	12.0	12.0	12.0	12.0
ICEV	Chassis cost	euro	148 800	150 217	151 706	153 271	154 916	156 645	158 462
BEV	Chassis weight, excl battery	kg	7 912	7 912	7 912	7 912	7 912	7 912	7 912
BEV	Chassis cost, excl battery	euro	134 805	133 481	132 284	131 202	130 224	129 340	128 541
BEV	Min net battery capacity	kWh	87	75	65	56	48	42	36

8.3.3HGV40

Subgroup	Variable	Unit	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Common	Annual distance	km	115 000	115 000	115 000	115 000	115 000	115 000	115 000
Common	Utilization	calendar days per year	230	230	230	230	230	230	230
Common	Utilization	h per day	12	12	12	12	12	12	12
Common	Power, peak	kW	550	550	550	550	550	550	550
Common	Tyres	euro per km	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
Common	Cargo capacity value	euro per ton-km	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
Common	Cargo capacity value	euro per m3-km	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
Common	Total weight limit	kg	40 000	40 000	40 000	40 000	40 000	40 000	40 000
Common	Depot stop	h	12	12	12	12	12	12	12
Common	Destination stop	h	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Common	Rest stop	h	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
Common	Drive session	h	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
Common	Driver cost	euro per h	34	34	34	34	34	34	34
ICEV	Chassis weight	kg	20 000	20 000	20 000	20 000	20 000	20 000	20 000
ICEV	Chassis cost, 2020	euro	235 200	235 200	235 200	235 200	235 200	235 200	235 200
ICEV	Lifetime	years	10	10	10	10	10	10	10
ICEV	Maintenance cost	euro per km	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
ICEV	Residual value at end of life	ratio	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
ICEV	Fuel consumption	liter per km	0.27	0.26	0.26	0.25	0.24	0.24	0.23
BEV	Maintenance cost	euro per km	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046
BEV	Residual value at end of life	ratio	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
BEV	Energy consumption	kWh per km	1.12	1.07	1.02	0.97	0.92	0.87	0.83
BEV	Min range buffer	km	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0
BEV	Lifetime	years	10.0	11.7	13.3	15.0	15.0	15.0	15.0

Subgroup	Variable	Unit	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
ICEV	Chassis cost	euro	235 200	237 795	240 522	243 388	246 400	249 566	252 893
BEV	Chassis weight, excl battery	kg	16 172	16 172	16 172	16 172	16 172	16 172	16 172
BEV	Chassis cost, excl battery	euro	204 866	202 893	201 110	199 499	198 042	196 725	195 534
BEV	Min net battery capacity	kWh	159	137	119	102	88	76	66

8.3.4HGV60

Subgroup	Variable	Unit	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Common	Annual distance	km	90 000	90 000	90 000	90 000	90 000	90 000	90 000
Common	Utilization	calendar days per year	230	230	230	230	230	230	230
Common	Utilization	h per day	10	10	10	10	10	10	10
Common	Power, peak	kW	750	750	750	750	750	750	750
Common	Tyres	euro per km	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
Common	Cargo capacity value	euro per ton-km	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
Common	Cargo capacity value	euro per m3-km	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
Common	Total weight limit	kg	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000
Common	Depot stop	h	14	14	14	14	14	14	14
Common	Destination stop	h	1	1	1	1	1	1	1
Common	Rest stop	h	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
Common	Drive session	h	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
Common	Driver cost	euro per h	34	34	34	34	34	34	34
ICEV	Chassis weight	kg	23 000	23 000	23 000	23 000	23 000	23 000	23 000
ICEV	Chassis cost, 2020	euro	259 200	259 200	259 200	259 200	259 200	259 200	259 200
ICEV	Lifetime	years	10	10	10	10	10	10	10
ICEV	Maintenance cost	euro per km	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10

Subgroup	Variable	Unit	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
ICEV	Residual value at end of life	ratio	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
ICEV	Fuel consumption	liter per km	0.35	0.34	0.33	0.32	0.32	0.31	0.30
BEV	Maintenance cost	euro per km	0.040	0.040	0.040	0.040	0.040	0.040	0.040
BEV	Residual value at end of life	ratio	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
BEV	Energy consumption	kWh per km	1.46	1.39	1.32	1.25	1.19	1.13	1.08
BEV	Min range buffer	km	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0
BEV	Lifetime	years	10.0	11.7	13.3	15.0	15.0	15.0	15.0
ICEV	Chassis cost	euro	259 200	262 737	266 454	270 361	274 467	278 782	283 318
BEV	Chassis weight, excl battery	kg	17 780	17 780	17 780	17 780	17 780	17 780	17 780
BEV	Chassis cost, excl battery	euro	215 795	213 303	211 051	209 016	207 176	205 513	204 009
BEV	Min net battery capacity	kWh	217	187	162	140	121	104	90

8.4 Laddinfrastruktur

Nyttjandegrad är andel av maximal installerad anläggningseffekt och har beräknats utifrån antagna belastningskurvor över ett dygn, en vecka och ett år, separat för varje typ av laddinfrastruktur. Samma kurvor har använts för att beräkna ett relativt snittpris på elektrisk energi, som en andel mellan elområdets nattpris och dagpris, där 0 % innebär nattpris och 100 % innebär dagpris.

Angivna kostnader för elvägar är satta för att approximera prisuppgifter och gissningar om framtiden vi fått ta del av från teknikleverantörerna Siemens, Elonroad och Electreon, för dubbelriktad väg, en fil i varje riktning, inklusive konstruktion av ett separat elnät längs vägen som med jämna mellanrum kopplas samman med det övriga elnätet.

Källor: Siemens, Elonroad, Electreon, ChargeNode, Ellevio, (Karlström, 2020), (Ivansson m.fl., 2006)

Subgroup	Variable	Unit	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	Annual change
ERS	base cost	euro per km	1 200 000	1 141 188	1 085 258	1 032 070	981 488	933 386	887 640	-1%

Subgroup	Variable	Unit	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	Annual change
ERS	power cost	euro per kW-km	150	143	136	129	123	117	111	-1%
ERS	maintenance cost	ratio per year	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0%
ERS	write off period	years	30	30	30	30	30	30	30	0%
ERS	profit margin	ratio	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0%
ERS	pick up cost base light	euro	500	452	409	369	334	302	273	-2%
ERS	pick up cost base heavy	euro	2 000	1 808	1 634	1 477	1 335	1 207	1 091	-2%
ERS	pick-up cost	euro per kW	50	45	41	37	33	30	27	-2%
ERS	pick-up lifespan	years	10	10	10	10	10	10	10	0%
ERS	pick up weight light	kg	50	48	45	43	41	39	37	-1%
ERS	pick up weight heavy	kg	300	285	271	258	245	233	222	-1%
ERS	standardization risk	ratio	50%	16%	5%	2%	1%	0%	0%	-20%
ERS	cost of standard change	ratio	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0%
ERS	utilization	ratio	43%	43%	43%	43%	43%	43%	43%	0%
ERS	electricity price	ratio	69%	69%	69%	69%	69%	69%	69%	0%
ERS	grid connection cable	euro	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	0%
ERS	grid connection interval	km	20	20	20	20	20	20	20	0%
ERS	reference	aadt	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	0%
ERS	range gain	ratio	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	0%
Station	hardware cost	euro per kW	500	475	452	430	409	389	370	-1%
Station	hardware maintenance	ratio	10%	10%	10%	9%	9%	9%	9%	-1%
Station	grid connection cable	euro	15 000	15 000	15 000	15 000	15 000	15 000	15 000	0%
Station	write off period	years	20	20	20	20	20	20	20	0%
Station	profit margin	ratio	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	0%
Station	utilization	ratio	43%	43%	43%	43%	43%	43%	43%	0%
Station	electricity price	ratio	69%	69%	69%	69%	69%	69%	69%	0%

Subgroup	Variable	Unit	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	Annual change
Station	reference	vehicles per day	100	100	100	100	100	100	100	0%
Depot	hardware cost	euro per kW	300	285	271	258	245	233	222	-1%
Depot	hardware maintenance	ratio	10%	10%	10%	9%	9%	9%	9%	-1%
Depot	grid connection cable	euro	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	0%
Depot	write off period	years	5	5	5	5	5	5	5	0%
Depot	profit margin	ratio	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	0%
Depot	utilization	ratio	44%	44%	44%	44%	44%	44%	44%	0%
Depot	electricity price	ratio	38%	38%	38%	38%	38%	38%	38%	0%
Depot	reference	vehicles per day	20	20	20	20	20	20	20	0%
Destination	hardware cost	euro per kW	500	475	452	430	409	389	370	-1%
Destination	hardware maintenance	ratio	10%	10%	10%	9%	9%	9%	9%	-1%
Destination	grid connection cable	euro	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	0%
Destination	write off period	years	10	10	10	10	10	10	10	0%
Destination	profit margin	ratio	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	0%
Destination	utilization	ratio	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	0%
Destination	electricity price	ratio	82%	82%	82%	82%	82%	82%	82%	0%
Destination	reference	vehicles per day	50	50	50	50	50	50	50	0%
Grid	initial access base	euro	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	0%
Grid	initial access	euro per kW	100	100	100	100	100	100	100	0%
Grid	fee at 100 percent utilization	euro per kWh	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0%

8.4.1 Laddinfrastrukturens nyttjandegrad

Nyttjandegraden för laddinfrastruktur beräknas som proportionen såld energi mot största möjliga energimängd som skulle kunna ha sålts inom samma tidsperiod givet installerad effekt. För små installationer av infrastruktur för statisk laddning har nyttjandegraden i praktiken ofta visat

sig vara mycket låg, under 10 %. Nyttjandegraderna som anges här är med avseende på hela anläggningens installerade toppeffekt, vilken kan och troligtvis bör vara lägre än summan av maxeffekten vid varje enskild laddpunkt. Anläggningar har antagits vara tillräckligt stora för att lastkurvan ska bli jämn. För elvägar har avståndet mellan anslutningspunkter till elnätet antagits vara så långt att antalet fordon mellan anslutningspunkterna följer en jämn kurva över dygnet. Om infrastruktur för statisk laddning byggs på sätt som resulterar i betydligt lägre nyttjandegrad än de nivåer som antagits för studien så blir brukarkostnaden högre och laddmetoden mindre konkurrenskraftig mot både annan laddinfrastruktur med högre nyttjandegrad och mot dieseldrift.

Källor: Statistik för antal fordon per timme för några tungt trafikerade vägavsnitt, egen erfarenhet.

	Utilization			
Hour of day	Depot	Destination	Station	ERS
0	100%	0%	20%	20%
1	100%	0%	20%	20%
2	100%	0%	25%	25%
3	100%	0%	25%	25%
4	100%	0%	35%	35%
5	85%	0%	40%	40%
6	70%	0%	60%	60%
7	30%	20%	70%	70%
8	10%	50%	80%	80%
9	5%	100%	90%	90%
10	5%	100%	100%	100%
11	5%	100%	100%	100%
12	80%	70%	100%	100%
13	80%	70%	100%	100%
14	5%	100%	100%	100%
15	5%	100%	90%	90%
16	5%	100%	80%	80%

	Utilization			
17	30%	50%	70%	70%
18	70%	20%	60%	60%
19	80%	0%	40%	40%
20	90%	0%	35%	35%
21	100%	0%	25%	25%
22	100%	0%	25%	25%
23	100%	0%	25%	25%
Average	61%	37%	59%	59%

Day of week	Utili- zation		Month	Utili- zation
Mon	100%		Jan	80%
Tue	100%		Feb	100%
Wed	100%		Mar	100%
Thu	100%		Apr	100%
Fri	100%		May	100%
Sat	40%		Jun	80%
Sun	40%		Jul	40%
Average	83%		Aug	80%
			Sep	100%
			Oct	100%
			Nov	100%
			Dec	80%
			Average	88%

variable	unit	Depot	Destination	Station	ERS
Annual utilization	percent	44%	27%	43%	43%
Electricity price	ratio min to max	38%	82%	69%	69%

8.5 Övriga

Den svenska elmarknaden är uppdelad i fyra områden (SE1-4, from norr till söder) och prissättningen av el är olika för dessa. Parameterantaganden för respektive elområde tillämpas i simuleringsmodellen baserat på laddinfrastrukturens placering. Elpriser utgår från historiska medelvärden dagtid och nattetid, tagna från Nord Pool. Vid datum för rapportens publicering är elpriset betydligt högre än dessa historiska medelvärden.

Dieselpriiser är framräknade baserat på historiska snittpriser för diesel, FAME och HVO, antagen prisutveckling för dessa, samt antaganden om graden av inblandning av biodiesel i det sålda bränslet. Vid datum för rapportens publicering är råvarupriserna högre än dessa historiska medelvärden och politiska diskussioner pågår om att minska den lagstadgade inblandningen av biodiesel i bränslet.

Samhällskostnaden för CO₂-utsläpp (Social Cost of Carbon, SCC) är den som antagits i Sverige och är långt över vad många andra länder antagit.

Dagens bränsle- och energiskatter har ersatts med en CO₂-skatt (proportionerlig mot genererade utsläpp) och en vägskatt. Detta för att kunna bibehålla dagens totala skatteintäkter från den andel som här benämns vägskatt.

Källor: Henrik Sällberg (BTH), Nordpool, (*Dieselskatt*, 2022; "Jämför företagslån", 2018; "Årsmedelspriser motorbränslen", 2022; Riksgälden, 2022; Sandgren & Nilsson, 2021; Trafikverket, 2020; Wallberg, 2021)

Group	Subgroup	Variable	Unit	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	Annual change
World	Economy	Public sector interest rate	percent	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	0%
World	Economy	Private sector interest public charging	percent	6%	6%	6%	6%	6%	6%	6%	0%
World	Economy	Private sector interest depot and trucks	percent	12%	12%	12%	12%	12%	12%	12%	0%

Group	Subgroup	Variable	Unit	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	Annual change
World	Charging	Extra stop overhead	h	0.17	0.14	0.12	0.11	0.09	0.08	0.07	-3%
World	CO ₂	SCC	euro per kg	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0%
World	CO ₂	Tax	ratio of SCC	0.12	0.17	0.22	0.27	0.32	0.37	0.42	5%
World	Diesel	Price	euro per liter	1.0	1.2	1.3	1.6	1.8	2.1	2.4	3%
World	Diesel	Emissions	kg CO ₂ per liter	2.6	2.1	1.7	1.4	1.1	0.9	0.8	-4%
World	Diesel	CO ₂ tax	euro per liter	0.22	0.25	0.27	0.27	0.26	0.24	0.22	0%
World	Diesel	Road tax	euro per liter	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0%
World	Electricity	Conversion ratio	kWh per liter	4.16	4.16	4.16	4.16	4.16	4.16	4.16	0%
World	Electricity	Road tax	euro per kWh	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060	0%
SE12	SE12	Price min	euro per kWh	0.034	0.036	0.038	0.040	0.042	0.044	0.046	1%
SE12	SE12	Price max	euro per kWh	0.049	0.051	0.054	0.057	0.060	0.063	0.066	1%
SE12	SE12	CO ₂ emissions	kg per kWh	0.010	0.009	0.007	0.006	0.005	0.005	0.004	-3%
SE12	SE12	CO ₂ tax	euro per kWh	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0%
SE34	SE34	Price min	euro per kWh	0.043	0.046	0.048	0.050	0.053	0.056	0.059	1%
SE34	SE34	Price max	euro per kWh	0.098	0.103	0.108	0.114	0.119	0.125	0.132	1%
SE34	SE34	CO ₂ emissions	kg per kWh	0.090	0.070	0.054	0.042	0.032	0.025	0.019	-5%
SE34	SE34	CO ₂ tax	euro per kWh	0.008	0.008	0.008	0.008	0.007	0.006	0.006	0%
OtherRegion	OtherRegion	Price min	euro per kWh	0.060	0.063	0.066	0.070	0.073	0.077	0.081	1%
OtherRegion	OtherRegion	Price max	euro per kWh	0.200	0.210	0.221	0.232	0.244	0.256	0.270	1%
OtherRegion	OtherRegion	CO ₂ emissions	kg per kWh	0.300	0.232	0.180	0.139	0.108	0.083	0.064	-5%
OtherRegion	OtherRegion	CO ₂ tax	euro per kWh	0.016	0.015	0.012	0.009	0.007	0.005	0.004	0%