



## Förstudie om logistiska konsekvenser av elektrifiering av godstransporter på väg

JOAKIM KALANTARI, VTI

IMAN PEREIRA, VTI

LEVERANS NR: 1



Projektnummer 2020.3.2.8
Titel på projektet – svenska Förstudie om logistiska konsekvenser av elektrifiering av godstransporter på väg
Titel på projektet – engelska The impact of electrification of road freight transport on transport logistics – a preliminary study
Projektledareorganisation Statens väg- och transportforskningsinstitut, VTI
Namn på projektledare Joakim Kalantari
Namn på ev övriga projektdeltagare Iman Pereira
Nyckelord: 5-7 st Nätverksmodell, elektrifiering, godstransporter, vägtransporter, konsekvensanalys, logistikanalys, scenarioanalys

## Sammanfattning

Det råder intensiv FoU-aktivitet beträffande elektrifieringen av det svenska godstransportsystemet. Av de många nyss påbörjade eller avslutade utvecklingsprojekt, studier, utredningar och regeringsuppdrag som helt eller delvis handlar om elektrifiering av långväga vägtransporter utgår får från användarperspektivet, d.v.s. transportproducenternas och transportköparnas perspektiv.

Ett angeläget område som behövs belysas i större utsträckning är de *logistiska konsekvenserna* av olika teknikval för elektrifiering för nyckelaktörer som är användare av *godstransportsystemet* d.v.s. Speditörer/åkare och varuägare. Med *logistiska konsekvenser* menas hur operationerna och prestandan av *produktionssystemet* för transporttjänster påverkas av olika tekniker för elektrifiering av det långväga, vägburna, godstransportsystemet. Med *produktionssystem* avses system i vilken *godstransportsystemets* infrastruktur och komponenter omsätts för att producera transporttjänster.

I den här förstudiens illustrerar vi en modelleringsansats för att studera vilka logistiska konsekvenser olika teknikval för elektrifiering av det svenska godstransportsystemet innebär för produktionssystemet av transporttjänster. Förstudien illustrerar hur den valda metodiken möjliggör kostnadseffektiv och ändamålsenliga dynamiska analyser av tänkbara utvecklingsscenario som bidrar till en kunskapsutveckling som underlättar hanteringen av effekterna avgörande osäkerheter som följer en snabb omställningsprocess.

Kombinationen av att kunna beskriva och analysera olika systemdesign, beskriva och förklara systemdynamiken givet stora osäkerheter och komplexitet samt möjlighet att testa och utvärdera potentiella lösningar på identifierade önskade effekter gör att den här modelleringsansatsen är särskild väl lämpad för det frågebatteri som har identifierats som intressant att studera i en huvudstudie. Förstudiens resultat nyttiggörs effektivast genom uppskalning och vidare utveckling i en huvudstudie så den aktuella modellen är framtagen i ett illustrativt syfte.

Projektet är genomfört i samarbete med DHL, Schenker, Trafikverket och Sveriges Åkeriföretag.

## Summary

There is intensive R&D activity regarding the electrification of the Swedish freight transport system. Of the many recently started or completed development projects, studies, analysis and government assignments that are wholly or partly about electrification of long-distance road transport, very few are based on the user perspective, i.e., the perspectives of transport producers and buyers.

An important area that needs to be highlighted to a greater extent is the logistical consequences of different technology choices for electrification, for key players who are users of the freight transport system, i.e., haulers and shippers. By logistical consequences means how the operations and performance of the production system for transport services are affected by different technologies for electrification of the long-distance, road freight transport system. Production system refers to a system in which the freight transport system's infrastructure and components are utilized to produce transport services.

In this feasibility study, we illustrate a modeling approach to study the logistical consequences of different technology choices for electrification of the Swedish road freight transport system for the production system of transport services. The feasibility study illustrates how the chosen methodology enables cost-effective and appropriate dynamic analyzes of possible implementation scenarios that contribute to the creation of knowledge that facilitates the management of the effects of crucial uncertainties that follow a rapid electrification process.

The combination of being able to describe and analyze different system designs, describe and explain system dynamics given great uncertainties and complexity as well as the opportunity to test and evaluate potential solutions to identified undesirable effects makes this modeling approach particularly suitable for tackling the battery of question identified as interesting to study in a main study. The results of the feasibility study create most value if they were to be scaled up and further developed in a main study, as the current model is developed for an illustrative purpose.

The project has been carried out in collaboration with DHL, Schenker, the Swedish Transport Administration and the Swedish Association of Road Transport Companies.

# Innehållsförteckning

## Innehåll

<b>Sammanfattning</b> .....	<b>2</b>
<b>Summary</b> .....	<b>3</b>
<b>Innehållsförteckning</b> .....	<b>4</b>
<b>1 Inledning</b> .....	<b>5</b>
1.1 Bakgrund.....	7
1.2 Syfte och projekt mål.....	8
<b>2 Bidrag till Triple F</b> .....	<b>10</b>
<b>3 Genomförande och modellbeskrivning</b> .....	<b>11</b>
3.1 Modellutveckling.....	11
3.2 Modellbeskrivning.....	12
3.3 Modellkonfigurationer och analyserade scenarion .....	15
<b>4 Resultat</b> .....	<b>18</b>
4.1 Illustration av föreslagen metodik.....	18
4.1.1 Huvudkonfiguration av modellen för olika scenarion.....	19
4.1.2 Scenariojämförelse – basscenario och elektrifiering med/utan elvägar.....	20
4.1.3 Scenariojämförelse – olika ruttning-/laddningsstrategier.....	24
4.2 Metodikens utveckling och tillämpning i ett huvudprojekt (HSM) .....	27
4.2.1 Modellkomponenters abstraktionsnivå .....	27
4.2.2 Optimeringsmodul.....	28
4.2.3 Ekonomimodul .....	28
4.2.4 Avslutande reflektioner kring modelltillämpning.....	29
<b>5 Nyttiggörande och nästa steg</b> .....	<b>29</b>
<b>6 Diskussion</b> .....	<b>30</b>
<b>Referenslista</b> .....	<b>33</b>

# 1 Inledning

Det står tilltagande klart att avfossilisering av det svenska godstransportsystemet för vägtransporter, kommer att kräva en hög grad av elektrifiering (Kågesson, 2019, SOU2021:48). Elektrisk framdrift har betydligt högre verkningsgrad än motsvarande förbränningsystem, den svenska el-mixen är redan i princip fossilfri (IEA, 2019) och därtill reducerar eldrift också andra skadliga utsläpp (exv. SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10, 2.5</sub>, VOC). Det finns stöd för att avfossiliseringen av godstransporter på väg genom elektrifiering är tekniskt genomförbart och samhällsekonomiskt lönsamt (Jussila Hammes, 2020, Wolff et al., 2020). Den stora utmaningen ligger snarare i att lyckas åstadkomma en omfattande elektrifiering under relativt kort tid (10 år) utan stora kostsamma felinvesteringar samt störningar i systemet och dess kritiska funktioner och prestanda.

Det finns olika tekniker för lagring och distribution av el-energi till lastbilar som till exempel batteridrift med stationär laddning (Liimatainen et al., 2019), batteridrift med undervägladdning/elvägar (Singh, 2016) och bränsleceller (Moriarty and Honnery, 2019, Pohl et al., 2017). Befintliga studier av elektrifiering av godstransporter är fokuserade kring utvärdering av olika tekniska upplägg med avseende på funktionalitet, teknisk prestanda och totalkostnader för investering, drift och underhåll. I litteraturen finns det också resultat från studier som fokuserar på miljö- och klimatkonsekvenserna av olika teknikval för elektrifiering (Kloo and Larsson, 2019, Nordelöv and Arvidsson, 2019) samt studier av konsekvenserna av olika teknikval för samberoende system som till exempel el-infrastrukturen (Taljegård, 2019, Obel et al., 2020), väginfrastrukturen, regelverk och policy samt fordons- och komponenttillverkning m.m. (Trafikverket, 2017). Det finns också studier beträffande företagsekonomiska förutsättningar för olika elektrifieringsstrategier (Hasselgren, 2019, Grauers, 2019) samt studier om affärsmodeller, aktörsroller och finansieringsmodeller för storskalig elektrifiering av godstransportsystemet (Andersson et al., 2019, Andersson et al., 2018). En ytterligare gren av forskning kring elektrifiering av transportområdet är studier gällande genomförbarhet och samhällsekonomiska effekter av olika teknikval för elektrifiering av godstransportsystemet på nationell nivå (Börjesson et al., 2020, Jonsson, 2018).

Ett område som inte har fått lika stort utrymme i forskningen, men som givet behovet av snabb omställning är en akut angelägenhet, är de *logistiska konsekvenserna* av olika teknikval för elektrifiering för nyckelaktörer som är användare av *godstransportsystemet* d.v.s. speditörer, transportörer och varuägare. Med *logistiska konsekvenser* menas hur operationerna och prestandan av *produktionssystemet* för transporttjänster påverkas av olika tekniker för elektrifiering av det långväga, vägburna, godstransportsystemet. Med *produktionssystem* avses system i vilken *godstransportsystemets* infrastruktur och komponenter omsätts för att producera transporttjänster.

För speditörer utgörs detta produktionssystem av fasta komponenter som nätverket av terminaler, vägar och annan infrastruktur och rörliga komponenter som fordon och lastbärare (Lumsden 2012). Det är den effektiva omsättningen av detta system som möjliggör produktionen och utvecklingen av transporttjänster som kan effektivisera varuägarnas försörjningskedjor (Abrahamsson, 2013). I den snabba utvecklingen som sker och förväntas accelereras i de närmaste decennierna ligger många av de kritiska besluten kring teknikval inte hos de aktörer som operativt kommer att nyttja godstransportsystemets komponenter för att producera och/eller konsumera godstransporttjänster. Den tekniska utvecklingen av de fasta och rörliga komponenter som utgör kärnan i produktionssystemet för transporttjänster, d.v.s. fordon och infrastruktur, sker bortom det som systemets användare och avsnämare (transportörer/speditörer och transportköpare) har rådighet över.

Detta skapar stora osäkerheter kring vilka förutsättningar som kommer att gälla och vad dessa kommer att innebära operativt för producenterna, och i förlängningen konsumenterna, av långväga, vägburna godstransporttjänster. Osäkerheter kring utformning och placering av elektrifierad infrastruktur, fordonsprestanda, kostnadsstruktur, regelverk, tidsplan för utrullning m.m. är avgörande för utformning, planering och styrning av produktionssystemet för transporttjänster i det elektrifierade godstransportsystemet, ur användarnas perspektiv. Den nya tekniken kommer således att innebära helt nya operativa randvillkor för produktionssystemet för transporttjänster. Detta kommer sannolikt också att innebära nya avvägningar, nya faktorer att beakta vid styrning och optimering av operationer samt delvis omdesign av berörda upplägg för produktion av långväga, vägburna godstransporttjänster. Drastiskt förändrade förutsättningar, randvillkor eller ändringar av kritiska systemegenskaper kan också leda till ett förändrat tjänsteutbud och/eller efterfråga.

Utan nödvändigheten av en snabb omställningen, skulle detta problem inte vara så stort eftersom utveckling, utvärdering, investeringar och uppskalning skulle kunna ske i sekvens, genom inkrementell utveckling samt över en längre tidsperiod, och därmed innebära färre osäkerheter. För att realistisk kunna nå 2045-målet<sup>1</sup>, måste dock flera av dessa steg ske parallellt vilket skapar stora osäkerheter som nyckelaktörer i användarledet svårligen kan hantera helt på egen hand. Det fordras att man tar fram den kunskap som behövs för speditörer, åkerier och varuägarna att redan i ett tidigt skede kunna överblicka de operativa, taktiska och strategiska konsekvenserna av olika teknikval för elektrifiering av godstransportsystemet på sina respektive system.

Det behövs nya kunskaper för att skapa bättre förutsättningar för dessa aktörer att på ett kostnadseffektivt sätt förbereda sin omställning till en elektrifierad vägtransportsystem för långväga godstransporter utan onödiga förseningar av omställningen eller störningar i transportsystemets funktion och prestanda. Detta är särskild angeläget givet osäkerheten av den framtida teknikmixen som kommer att möjliggöra ett fossilfritt godstransportsystem. På samma sätt, skulle bristen på denna kunskap innebära en svaghet i de underlag på vilka infrastrukturhållare, beslutfattare, teknikleverantörer m.fl. baserar sina beslut om teknikval och investeringar beträffande elektrifiering av godstransportsystemet. Detta följer av att i brist på god förståelse och kunskap om konsekvensen av olika teknikval på produktionssystemets egenskaper och prestanda, har användarledet begränsade möjligheter att kunna agera som kompetenta och effektiva kravställare uppströms d.v.s. i förhållande till t.ex. infrastrukturhållare och fordonstillverkare. Det i sig utgör en beaktansvärd risk för en kostnadseffektiv omställning till ett fossilfritt godstransportsystem, inom de tidsramar som följer de uppsatta målen, med potentiellt negativa effekter över lång tid.

I den här förstudien illustrerar vi en metodik för att modellera realistiska scenarion om olika tänkbara teknikmixer i den framtida elektrifierade vägtransportsystemet för långväga godstransporter. Metodiken ska möjliggöra framtagning av ändamålsenliga modeller för att analysera de logistiska konsekvenserna av troliga elektrifieringsscenarion ur speditörer, åkerier och varuägares perspektiv. Analysmetodiken som tas fram ska kunna skalas upp i ett huvudprojekt så att nyttan ska kunna realiseras av transportproducenter och -köpare i första hand men också övriga nyckelaktörer som fordonstillverkare och infrastrukturhållare. Ett ytterligare syfte med förstudien är också att illustrera hur den föreslagna modelleringsansatsen kan omsättas för kostnadseffektivt genomförande av för den snabba omställningen, nödvändiga systemanalyser.

---

<sup>1</sup> Med 2045-målet avses målet att Sverige senast år 2045 inte ska ha några nettoutsläpp av växthusgaser till atmosfären.

Förstudiens resultat består av en beskrivning av metoder och modeller för scenariomodellering för elektrifiering som möjliggör analyser av de logistiska konsekvenserna av olika scenarion för respektive aktörsgrupp. Detta för att i ett huvudprojekt kunna ta fram bl. a. ny kunskap om hur randvillkoren för det operativa produktionssystemet förändras, till vilken effekt och vilka nya överväganden som måste ingå i design och operation av befintliga produktionssystem i olika framtida elektrifieringsscenarion. Den föreslagna metodiken möjliggör också jämförande analys och utvärdering av alternativa systemupplägg beträffande teknikmix, design, prestanda, planering och styrning samt operationer.

Dessa kunskaper är nödvändiga för att kunna ta fram beslutsunderlag för teknikval, investering- och omställningsbeslut som möjliggör en kostnadseffektivt och framgångsrik tillämpning av åtgärder för omställning till fossilfria godstransporter på väg framför allt ur speditörer, åkare och varuägares perspektiv. Effektiviteten av transportsystemet spelar en avgörande roll för den svenska industrins konkurrenskraft vilket gör bibehållen/ökad prestanda och kostnadseffektivitet under och efter omställningen kritiskt viktigt.

## 1.1 Bakgrund

Elektrifieringen av transportsystemet som en reaktion till olika miljöproblem återfinns i litteraturen sedan många år tillbaka och det gäller både person- och godstransporter. De tidiga studierna om elektrifierade godstransporter har framförallt berört citylogistik, sista-milen-distribution och motsvarande (Taefi, 2016, Teoh et al., 2018). I en svensk kontext har forskningen kring elektrifiering av långväga, vägburna godstransporter intensifierats i samband med att idén om el-vägar på allvar lanserades som en tänkbar lösning på avfossilisering av det svenska godstransportsystemet (Trafikverket, 2017). Parallellt med detta har forskning om andra tekniker att elektrifiera transportsystemet, som batteri- och hybriddrift och bränsleceller också ökat markant under samma tidsperiod. Även om det finns en stor och växande mängd forskning, utveckling och utredningar, i offentlig så väl som privat regi, så är frågeställningarna som adresseras här, i stort sett, en vit fläck i litteraturen.

Forskningen om elektrifiering av godstransporter fokuserar huvudsakligen på elektrifiering av godstransportsystemet, dess komponenter och implementering. I den mån elektrifieringens effekter på de operativa perspektiven, eller produktionssystemets förutsättningar, behandlas berör dessa sällan långväga transporter, utan fokus ligger främst inom citylogistik/sistamilen-distribution. Även i dessa studier verkar fokuset på produktionssystemet och dess ingående aktörer inte gå djupare än att ta hänsyn till fordonens begränsningar med avseende på räckvidd och laddningstider i de traditionella ruttoptimeringsproblemen (se till exempel Froger et al. (2019) och Zhang et al. (2020)). Den befintliga litteraturen är således otillräcklig för att kunna hantera de osäkerheter som de transportproducerande aktörerna möter i en kommande storskalig och snabb elektrifiering av de långväga, vägburna godstransportsystemet.

Den höga praktiska relevansen och problemlösande karaktären av den här studien skapar ett behov av en ansats som är förenlig med det faktum att fenomenet som ska studeras, i egentlig mening, inte finns i empirin. För att kunna kombinera problemlösning och praktisk relevans med vetenskaplig stringens är studien utformat på ett design science-ramverk (Holmström et al., 2009). Design science är en vetenskapsteoretisk ansats, med tillämpningar bl.a. inom logistikforskning, som möjliggör empiriskt grundande, vetenskapligt stringenta studier av lösningar, koncept och scenarion som ännu inte finns representerad i empirin (Tranfield et al., 2003, Denyer et al., 2008). På samma sätt är simulering ett passande metodval i sammanhanget. Simulering möjliggör analyser av experiment på system där det inte är möjligt eller kostnadseffektivt att genomföra tester i det verkliga systemet (Goldsman, 2007).



Simulering är särskild lämplig i fall där man har många olika scenarion/utföranden av samma system att studera och jämföra med varandra (Banks, 1998, Law and Kelton, 2000). Det finns specifikt exempel där design science-ramverk och simulering har kombinerats för utveckling/utvärdering av nya produktionskoncept beträffande produktionssystemet för godstransporter (se t.ex. Kalantari (2012)). I den här förstudien illustrerar vi metodik för modellering och analys av logistiska konsekvenserna av olika teknikmix-scenarion för elektrifiering av det vägburna godstransportsystemet. I den här rapporten illustreras hur den föreslagna metodiken kan tillämpas för att utveckla modeller för bättre beslutsstöd för speditörer, åkare och varuägare. Den nya kunskapen möjliggör också för dessa aktörer att baserad på bättre förståelse av konsekvensen av olika elektrifieringsscenarion kunna ställa mer kvalificerade krav på utvecklingen av systemets komponenter (exv. fordons- och infrastrukturutveckling). För att kunna få ut validerade resultat måste modellen skalas upp och valideras i ett huvudprojekt. Metodutvecklingen i denna förstudie syftar till att illustrera genomförbarhet, tillämpning och nyttan av en fullskalig, validerat modell.

## 1.2 Syfte och projektmål

Förstudiens syfte är att illustrera en metodik för att studera vilka *logistiska konsekvenser* olika teknikval för elektrifiering av det svenska *godstransportsystemet* för långväga vägtransporter innebär för *produktionssystemet* av transporttjänster ur speditörer, åkerier och varuägares perspektiv. Med *produktionssystem* avses system i vilken *godstransportsystemets* fasta och rörliga komponenter (t.ex. infrastruktur, fordon, lastbärare m.m.) omsätts för att producera transporttjänster. *Logistiska konsekvenser* avser förändringar i design, styrning, drift, optimering och prestanda av *produktionssystemet* som följer elektrifieringens påverkan på *godstransportsystemets* förutsättningar, egenskaper och kapabiliteter. Drastiskt förändrade randvillkor eller ändringar av kritiska systemegenskaper kan också leda till ett förändrat tjänsteutbud och/eller efterfråga.

Den snabba utvecklingen inom området och kraven på snabb omställning innebär ett stort behov av kunskap om det här området i närtid för att möjliggöra implementering av omställningen i den takt som krävs. Hittills har området inte berörts i tillräcklig utsträckning i den befintliga litteraturen. Kraven på omställningstempot innebär också att många olika tekniker utvecklas samtidigt och det råder stora osäkerheter kring hur de olika teknikerna kommer att påverka användarnas system. Utvecklingen och implementerings-/teknikvalsbeslut i avgörande avsnitt som infrastruktur, tekniska komponenter som fordon och energilagring-/distributionssystem ligger utanför användarnas rådighet vilket ytterligare ökar osäkerheterna och agerar som ett effektivt hinder för snabb, storskalig tillämpning.

Osäkerheten som utgör ett hinder för ett snabbt omställningsförlopp till elektrifiering för speditörer och åkerier härstammar delvis från att det fortfarande är oklart vilka tekniker som kommer att få genomslag. Teknikutvecklingstempot inom området är högt, vilket i sig nödvändiggör dynamiska analysverktyg som snabbt ska kunna anpassas till den nya tekniska förutsättningar i syfte att möjliggöra snabb och kostnadseffektiv tillämpning av nya tekniker på systemnivå.

Utöver det, även givet att den framtida teknikmixen skulle varit mindre osäker, kommer elektrifieringen av godstransportsystemet att innebära att randvillkoren för produktionssystemen kommer att förändras. Effekterna som blir en följd av denna omställning är ännu inte studerade i tillräcklig utsträckning samtidigt som att kunskapen om dessa effekter är avgörande för speditörer, åkerier och varuägares förmåga att planera, förbereda och genomföra omställningen i sina respektive system. Därför är angreppssättet att försöka klargöra de tänkbara scenariona beträffande teknikmixer som elektrifieringen av det svenska godstransportsystemet kan komma att innebära samt studera vilka

de logistiska konsekvenserna kommer att bli för produktionssystemet av långväga, vägburna godstransporter.

Målet med förstudien är att, genom metodutveckling som tillåter dynamisk scenariomodellering och -analys, möjliggöra framtagning av verktyg för att bidra till att överbrygga den kunskapslucka som idag finns beträffande de logistiska konsekvenserna av elektrifiering framförallt ur speditörer, åkerier och varuägares perspektiv. Kunskap om de logistiska konsekvenserna som olika tekniker, eller kombination av tekniker för elektrifiering av det svenska godstransportsystemet för vägtransporter innebär för speditörer, åkerier och varuägare är helt avgörande för dessa aktörers strategier för en snabb och effektiv omställning. På samma sätt är dessa kunskaper nödvändiga för infrastrukturhållare, teknikleverantörers och andra beslutsfattare vid utvärdering av de olika tekniska alternativen. Ett fullskaligt och validerat tillämpning av den framtagna metodiken kan också resultera i underlag som infrastrukturhållare, policymakare och teknik- och tjänsteleverantörer behöver för att underlätta snabb och kostnadseffektiv omställning som säkerställer att de transportpolitiska målen uppnås.

## 2 Bidrag till Triple F

Den här förstudien illustrerar möjligheterna och kunskapsutvecklingspotentialen i att utveckla en fullskalig, validerat modell som möjliggör genomförande av dynamiska analyser av det komplexa produktionssystem som den svenska långväga vägburna godstransportsystem är, och dess elektrifiering. Det dynamiska analysverktyget som möjliggörs av en fullskalig, validerat modell, är nödvändig för att ta fram den kunskap som är nödvändig för de aktörer som kommer vara de som faktiskt använder sig av det elektrifierade godstransportsystemet, d.v.s. speditörer, åkare och varuägare, givet den korta omställningstiden, systemets komplexitet samt de stora osäkerheter som råder kring det elektrifierade systemets tekniska specifikation.

Kunskapen är nödvändig för dessa aktörers förmåga att kunna strategisk och operativt planera en omställning till ett fossilfritt godstransportsystem, som inkluderar en omfattande elektrifiering av de långväga godstransporterna på väg, trots det osäkerheter som omger teknikvalet. Nuvarande kunskapsläge samt det faktum att kritiska och avgörande val av tekniska lösningarna för elektrifiering ligger utanför speditörer, åkare och varuägares rådighet skapar hinder för dem att strategisk planera eller övervägt prioritera mellan olika tekniska val.

På samma sätt, är användarperspektivet, d.v.s. hur speditörers, åkeriers och varuägares respektive system påverkas av de olika tekniska alternativen inte med i de underlag på vilka andra kritiska aktörer som infrastrukturhållare, lagstiftare, teknikleverantörer m.fl. utvärderar och baserar sina beslut om teknikval på. Att bidra med att fylla den här kunskapsluckan skulle öka kvaliteten på de avgörande val och strategiska planering som krävs för en kostnadseffektivt och snabb elektrifiering av godstransportsystemet.

Det möjliggör också för de kritiska aktörerna i användarledet att parallellt med utvecklingen av teknik och infrastruktur, både strategisk och operativt, förbereda sin omställning till tilltagande grad av elektrifiering. Den här kunskapen är också en förutsättning för att dessa processer ska kunna löpa parallellt, vilket i sin tur skulle påskynda omställningstakten och samtidigt minska riskerna för kostsamma felinvesteringar som dagens osäkerheter och bristande kunskap annars kan leda till. De råder i princip konsensus om att elektrifiering av de långväga, tunga godstransporterna på väg är oundviklig pusselbit för omställning till ett fossilfritt godstransportsystem. Den kunskap som sökes tas fram genom detta projekt är kritisk viktigt om omställningen ska kunna ske i den takt som krävs för att klara 2045-målet.

## 3 Genomförande och modellbeskrivning

Förstudien är genomförd i samarbete med DHL, Schenker, Sveriges åkeriföretag och Trafikverkets elektrifieringsprogram. Metodutvecklingsarbetet har i huvudsak genomförts av VTI, och genom hela utvecklingsarbetet har industri-/myndighetsparternas kompetens och erfarenheter tillvaratagits för att säkerställa att den framtagna metodiken är ändamålsenlig och praktisk tillämpningsbar. Nedan redovisas utvecklingsprocessen av modellen, en beskrivning av den framtagna modellen samt de analyserade scenarion och dess resultatparametrar.

### 3.1 Modellutveckling

Två omständigheter har krävt särskilda metodologiska övervägande i förstudien. För det första handlar det om att utveckla metodik för att studera effekterna av förändringar i system, som ännu inte har ägt rum och därmed i egentlig mening inte går att empiriskt observera. För det andra har studiens syfte varit att illustrera en ändamålsenlig metodik att tillämpas i en huvudstudie. Det innebär i sin tur att metodiken ska kunna presenteras på ett sätt som är upplysande beträffande en fullskalig, validerad tillämpning, även om förstudiens omfattning inte medger att presentera resultat som i sig går att empiriskt validera.

För att hantera den första omständigheten har metodutvecklingsarbetet baserats på en design science perspektiv. Design science är ett vetenskapsfilosofiskt angreppssätt som möjliggör studier av planerade förändringar och dess effekter utan att göra avkall på vetenskaplig stringens (Holmström et al., 2009). Det finns exempel på tillämpning av design science för analys och utveckling av effektivitetshöjande koncept i godstransportnätverk (se till exempel Arnäs et al. (2013)). Den andra svårigheten har hanterats genom att tillsammans med industripartnerna ta fram en ideal-typisk systemupplägg att modellera som är väl anpassad till svenska förhållande men som inte representerar någon av industripartnernas egna system.

Det modellerade systemet är löst baserat på empiriska förhållanden som ligger inom toleransen för hur nyckelparametrarna varierar i respektive speditörs referenssystem. Förenklad innebär det att nätverkets densitet, efterfråga, tjänsteutbud, prestanda etc. är inom rimliga intervaller jämfört med industripartnernas egna system och erfarenheter utan att för den skull vara en validerad representation av någon av dessa system. Detta möjliggör för den utvecklade modellen att illustrera modelleringsmetodik, databehov och analysmöjligheter som modellen medger. Dessa resultat illustrerar hur man skulle kunna ta fram en fullskalig modell och vilka analyser som då går att genomföra (alternativt vilka forskningsfrågor det går att besvara) med den här modelleringsansatsen. Däremot går det inte att dra några slutsatser från modellresultaten i sig eftersom det modellerade systemet egentligen inte finns i verkligheten och modellresultaten går inte att empiriskt validera.

Inledningsvis har en konceptuell modell utvecklats. Den konceptuella modellen har kvalitetssäkrats tillsammans med övriga projektpartners. Därefter har modellen kodats till en exekverbar simuleringskod. Simuleringsmodellen går att konfigureras i olika scenarion och resultaten från olika körningar möjliggör jämförande analyser av olika förändringar/åtgärders effekt på systemet egenskaper, prestanda och effektivitet. Dessa analyser ger också goda indikationer på krav/behov på/av till exempel fasta och rörliga systemkomponenter eller andra kritiska förutsättningar.

Simuleringsmodellen har seedats med empiriskt inspirerad, genererat data. Data har genererats med inspiration från industripartnernas egna system utan att i detalj representera någon specifik verklig system. Avgränsningar och omfattningsval har genomförts tillsammans med industripartnerna i syfte att hitta en lämplig balans mellan förstudiemodellens begränsade omfattning utan att göra för stort avkall

på dess illustrativa förmåga beträffande en fullskalig, validerad modell baserad på specifika transportsystem. Modellen verifierats genom ex post analyser av körningsresultaten.

Nedan beskrivs nätverket och dess komponenter samt modelleringsansatsen. Modellen är en diskret händelsestyrd modell, implementerad i matlab 2020b. Eftersom syftet i denna förstudie inte har varit att bygga en empirisk validerad representation av ett befintligt transportnätverk utan snarare en illustration av utvecklad metodik för framtagning av en fullskalig modell, bör all output som ges av modellen ses som resultatexempel som i sin tur kan ge en indikation om analysmöjligheter som sådan metodik skapar. Det går inte att dra några generellt giltiga slutsatser från modellresultaten.

Nätverket som modelleras är ett direktdistributionsterminalnätverk för stycke- och paketgoods. Endast fjärrtransporterna (transport mellan terminaler) ingår i modellen. Insamling- och distributionstransporterna till och från terminalerna är viktiga komponenter i en huvudstudiemodell (HSM) som har avgränsats i förstudiemodellen (FSM). Presentationen nedan berör FSM som har avgörande avgränsningar jämfört med den tilltänkta HSM. Implikationen av detta kommer att diskuteras vidare i 4.2 nedan.

Modellen går att köra i två huvudkonfigurationer: a) en basmodell med konventionella dieselbilar och b) en elektrifierad modell med endast batterielektriska bilar. Det går också att köra modellen i en hybrid-konfiguration med olika penetrationsgrad av elektrifiering, d.v.s. en andel av trafiken (mellan 0-1, där 0 är samma som basmodellen och 1 är den heleelektriska konfigurationen) som är elektrifierat. I den elektrifierade versionen kan bilarna laddas i stationära laddningsstationer som finns längs länkarna eller, av elvägar längs de länkar som är elektrifierade. Elvägarna kan användas för samtidig laddning och framdrift. Elvägarna har ingen kapacitetsbegränsning i modellen, medan laddningsstationerna är modellerade med kapacitetstak. Det elektrifierade scenariot går att köra med eller utan elvägar (d.v.s. med endast laddstationer). Laddning i noderna (terminalerna) ingår inte i modellen, men modellen beräknar laddningskapacitetsbehovet i noderna, för olika scenarion.

I både huvudkonfigurationerna har lastbilsflottan modelleras enhetligt d.v.s. hela flottan består endast en lastbilsmodell/-storlek. I fallet med hybrid-konfigurationen, d.v.s. delvis elektrifiering, är respektive lastbilskategori enhetligt modellerat, men man kan välja olika storlek/egenskaper för konventionella diesel- respektive el-lastbilar. Modellen tar inte heller hänsyn till obalanser i transportefterfrågan/flöden i nätverket eller tillgång till lastbilar i noderna d.v.s. att det alltid kommer att finnas tillräckligt många lastbilar tillgängligt i alla noder för att kunna möta efterfrågan. Således ingår inte heller Retur- och ompositioneringstransporter i FSM. På samma tema, innehåller FSM inte någon optimeringsmodul. Ruttning- och laddningsstrategier anges som ingångsvärden med hjälp av enkla heuristiska algoritmer för varje scenario.

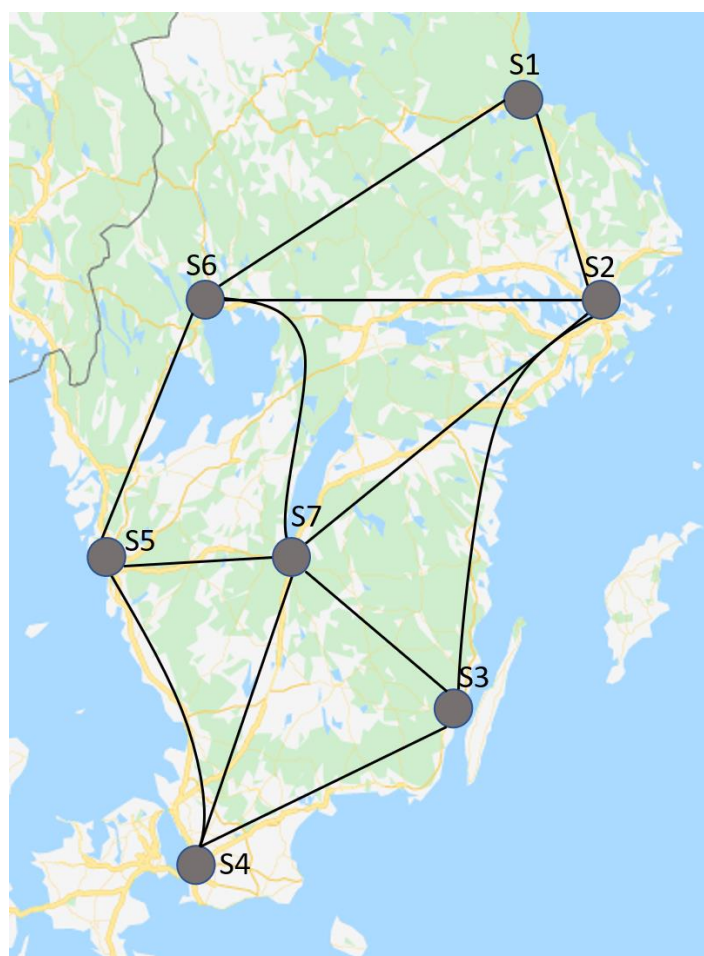
## 3.2 Modellbeskrivning

Det modellerade nätverket består av 7 noder. Det ideal-typiska terminalnätverket som modelleras, tar inspiration från lämplig empiri, enligt beskrivningen ovan. Tre länkar i nätverket är elektrifierade (d.v.s. elvägar som möjliggör framdrift och laddning under färd). Det finns också två laddningsstationer på samtliga länkar (d.v.s. 24 laddningsstationer i hela nätverket). Konventionella bilar är modellerade som 60 ton lastbilar med 47 ton nyttolast. Elektriska lastbilar är modellerade som 40 ton lastbilar med 27 ton lastkapacitet och 250 km räckvidd. För att möjliggöra känslighetsanalys mellan olika scenarion, kan modellen också köras i en konfiguration där det inte finns någon skillnad i nyttolastkapacitet mellan de olika lastbilstyperna. Konkret innebär detta att man sänker nyttolastkapaciteten för dieselbilar vilket är en orealistiskt antagande, som endast syftar till att möjliggöra känslighetsanalyser mellan olika scenarion.

Det modellerade distributionsnätverket tar empirisk inspiration från industripartnernas stycke- och paketgodsnätverk i södra Sverige. Det innebär att data beträffande nodernas placering i nätverket, avstånd mellan noder, efterfrågan och dess spridning, avgångs- och ankomsttider, väginfrastrukturen m.m. är generade på sådant sätt att detta inte förefaller som orimliga i jämförelse med de befintliga nätverken. Nätverket består av 7 noder som är utplacerade utifrån följande städers lokalisering.

- Stockholm
- Göteborg
- Malmö
- Jönköping
- Kalmar
- Karlstad
- Gävle

Nätverket i sin helhet med noder och förbindelsevägar illustreras i Figur 1. Distanserna mellan terminalerna är hämtade från Google maps, där varje distans antas vara den kortaste vägen mellan varje OD-par. I modellen finns inga alternativa vägar utöver de modellerade länkarna, d.v.s. transporter som inte går den kortaste vägen mellan två noder, passerar alltid ytterligare en nod. Inga omlastningar antas utföras, oberoende av rutt genom nätverket, vilket innebär att varje lastbil lastas på med gods en gång och kör sedan till sin destination för avlastning. Modellen tar hänsyn till kör- och vilotider samt laddningstider (som i fallet med konventionella diesellastbilar antas vara 0).



Figur 1 Illustration av modellerat terminalnätverk i förstudiemodellen (FSM)



Det elektrifierade nätverket skiljer sig från basmodellen i det att laddningsstationer och elvägar finns representerade. Laddningsstationerna är placerade på den första och sista kvartilen av länkarna mellan varje OD-par. I modellen antas att varje körning startas med lastbilar med fullt laddade batterier. När behov för laddning uppstår, laddas batterier fullt. Modellen laddningsheuristik strävar efter att synkronisera laddnings- och vilotid i möjligaste mån. Laddstationerna har en maxkapacitet om 1 lastbil och i heuristiken vägs behovet av laddning, vila och tillgänglighet mot varandra för att besluta om lastbilen ska stanna och ladda när en station passeras eller inte. Om en lastbil behöver laddas men laddstationen är otillgänglig, ställs lastbilen i en FIFO-kö.

Avsaknaden av en optimeringsmodul är en svaghet eftersom enda möjligheten att utvärdera olika laddnings-/ruttningsstrategier blir deterministiskt scenariotestning. I en HSM är det kritisk viktigt att inkludera en optimeringsmodul för laddnings- och ruttningsstrategier.

Elvägarna är representerad i form av tjocka svarta länkar (Figur 2) och är de länkar som sammanbinder de tre godsterminalerna med högst godsefterfrågan, S2, S5 och S4, samt den centralt placerade godsterminalen S7. Fordon som färdas på dessa har möjlighet att kombinera laddning och framdrivningen av fordonet. Laddstationerna i nätverket är illustrerade med röda prickar på länkarna med beteckningen Cx.



Figur 2 illustration av elektrifierad nätverk i FSM

### 3.3 Modellkonfigurationer och analyserade scenarion

De olika konfigurationer som undersöks i denna förstudie bygger i huvudsak på tre variabler, ruttningalternativ, elektrifieringens penetrationsgrad samt tillgång till elvägar. Det finns två ruttningalternativmodellerade i FSM, något som bör ersättas med en mer sofistikerad ruttoptimeringsmodul i en HSM.

**Ruttningalternativ 1 (Kortaste vägen)** – ruttningen i basscenariot bygger på ett antagande om att transporter mellan samtliga O-D-par sker den kortaste vägen. För ruttningalternativ 1 används samma rutter med skillnaden att eldrivna lastbilar vid behov stannar för laddning vid någon eller i förekommande fall flera av laddstationerna längs sin rutt.

**Ruttningalternativ 2 (Minst antal stop)** – Premissen för ruttningalternativ 2 bygger på att minska antalet stopp för de eldrivna fordonen och nyttja elvägarna i största möjliga utsträckning. Detta leder till att fordon i stället för att åka närmsta vägen ibland tar en omväg. Till exempel ett fordon som i vanliga fall kör ruten S5-C9-C8-S4, kör i ruttningalternativ 2 i stället S5-S7-S4.

De undersökta penetrationsgraderna i varje ruttningalternativ är 0 (d.v.s. basmodellen), 50 och 100 procent. Penetrationsgraden avser inte andelen av lastbilsflottan som är eldriven utan andelen av gods som fraktas med eldrivna fordon. Kombinationen av ruttningalternativ, penetrationsgrad och tillgång till elvägar ger förutom basscenariot, ytterligare 6 utfallsscenario.

I samtliga scenarion har laddningsstationerna en kapacitet på 1 fordon åt gången och en laddningstid på 100 minuter, från tomt till ett fulladdat batteri. Vidare har ett eldrivet fordon med fullt batteri en räckvidd på 250 km. För elvägarna antas varje fordon kunna ladda med en effekt på 0.7 kwh/km vilket är ett optimistiskt antagande.

I tabellerna nedan sammanfattas förstudiemodelens inputparametrar och outputvariabler.

Tabell 1 Beskrivning av inputparametrar i FSM

Inputparameter	Beskrivning
<i>OD-matris</i>	Definierar avstånden mellan godsterminaler
<i>Laddinfrastruktur</i>	Definierar antal/position/kapacitet av laddstationer och elvägar
<i>Ruttningstrategi</i>	Beskriver vilken rutt ett fordon tar mellan godsterminaler
<i>Transportefterfrågan</i>	Definierar efterfrågan mellan de olika OD-relationerna
<i>Fordonstyp</i>	Diesel eller eldriven lastbil
<i>Lastkapacitet</i>	Nyttolastkapacitet i ton
<i>Terminalhantering</i>	Tid för lastning vid terminal (min)
<i>Hastighet</i>	Medelhastighet för effektiv körtid, d.v.s. ej dörr till dörr (km/h)
<i>Räckvidd</i>	Anger batterikapacitet för el-lastbilar (km)
<i>Laddningstid</i>	Anger laddningstid (min)



<b>Inputparameter</b>	<b>Beskrivning</b>
<b>Avgång- och ankomsttider</b>	Anger tidigaste avgångstid och senaste ankomsttid för transporter för varje O-D-par.
<b>Kör- och vilotider</b>	Anger villkoren för kör- och vilotider
<b>Elvägar</b>	1/0
<b>Penetrationsgrad</b>	0-1

Med hjälp av parameterna Tabell 1 kan modellen konfigurerats för körning av olika scenarion. Vissa variabler är förknippad med ett spridningsmått som till exempel transportefterfrågan mellan O-D-par och terminalhanteringstid. Andra variabler är konstanta, som till exempel lastkapacitet, medelhastighet, räckvidd, laddningstid m.m. Kör- och vilotider är situationsberoende och hanteras delvis av laddningsheuristiken. Parametrar som räckvidd och laddningstid som i tabellen angivits ha enheterna km respektive minuter, är härledda från andra relevanta mått som batteristorlek, effektbehov etc. Antagna värden är framtagna i diskussion med experter från branschen för att säkerställa att dessa är rimliga givet för närvarande befintlig prestanda. I Tabell 2 redovisas modellens outputvariabler.

*Tabell 2 Beskrivning av outputvariabler i FSM*

<b>Outputvariabler</b>	<b>Beskrivning</b>
<b>Fordons-ID</b>	Unikt identifikationsnummer för varje fordon
<b>Restid</b>	Tiden det tar för ett fordon transportera gods mellan två terminaler (h).
<b>Effektiv körtid</b>	Är den faktiska körtiden, där vilotider och andra stopp är exkluderade (h).
<b>Vilotid</b>	Vilotiden uttryckt i timmar (h)
<b>Avgång- och ankomsttider</b>	Tidpunkter då fordon avgår från- och ankommer till godsterminaler (HH:MM:SS).
<b>I tid</b>	En binär variabel 1 visar att fordonet har kommit i tid och 0 att det finns en försening.
<b>Försening</b>	Förseningen uttrycks i timmar per fordon
<b>Trafikarbete</b>	Den körda sträckan uttryckt i kilometer
<b>Fyllnadsgrad</b>	Kvot av tillgänglig och nyttjat lastkapacitet.
<b>Genomfört transportarbete</b>	Antal tonkm per fordon.
<b>Totalt transporterat godsmängd</b>	Mått på godsmängden i nätverket i ton

<b>Outputvariabler</b>	<b>Beskrivning</b>
<b>Laddningstid</b>	Total laddningstid per fordon vid laddstation (h)
<b>Laddning</b>	Antal stopp ett fordon utför i syfte att ladda.
<b>Kötid</b>	Total kötid per fordon vid laddningsstation (h).
<b>Beläggning</b>	% av laddstationernas kapacitet som nyttjas
<b>Batterikapacitet vid ankomst</b>	Visar hur mycket effekt som finns kvar i batteriet vid ankomst (kwh)
<b>Effektåtgång</b>	Mängden kwh som gått åt för framdrift och laddning av fordonet.

## 4 Resultat

Förstudiemodellens (FSM) har utvecklats för att illustrera tillämpningsbarheten av den här typen av modelleringsansats för de identifierade frågeställningarna och kunskapsbehovet. Så till vida är den mycket mer begränsad i sin omfattning än en fullskalig, empiriskt validerad modell. Det är fullt möjligt att utöka/förfina de in- och utvariabler som har valts. Det går också att göra betydligt fler analyser på den output som FSM producerar eller öka de antal scenarion som studeras. Men eftersom den här modellen inte är empiriskt validerad, går det inte att dra några användbara slutsatser om det system som modellerats eftersom indata inte motsvarar ett system som existerar i verkligheten. Det skapas således inget ytterligare mervärde genom förfining/utökning av analysinsatsen, utöver illustrationen av tillämpligheten av modelleringsansatsen som nedan visas med hjälp av ett urval av exempelscenarion och -analyser.

Att använda en diskret händelsestyrd modell för simulering av ett transportsystem som ett produktionssystem är en mycket användbar metod för analys av de logistiska konsekvenserna av elektrifieringen av det svenska godstransportsystemet på väg. I en validerad modell blir det möjligt att beskriva förändringar i systemdynamiken till följd av olika elektrifieringsscenarion. Man kan också identifiera och analysera de olika logistiska konsekvenserna av olika elektrifieringsscenarion med avseende på systemets effektivitet och prestanda. Den nya kunskapen som kan genereras utifrån analysen av resultat från simuleringsmodellen är nödvändig för att hantera de osäkerheterna som råder beträffande tekniska, ekonomiska och operativa förutsättningarna som är förknippad med en storskalig omställning till elektrisk framdrivning. Det finns ingen självklart sätt att minimera befintliga osäkerheter som elektrifieringen innebär givet de snabba förändringar som förväntas äga rum under de närmaste decennierna i syfte att nå de transport-, miljö- och klimatpolitiska målen. Detta leder i sin tur till att möjligheten att kunna hantera dessa osäkerheter på ett konstandeffektivt sätt blir en avgörande möjliggörare för lyckad, storskalig elektrifiering av detta transportsegment.

Den här typen av analyser skapar förutsättningar för att beskriva förändringar i systemdynamik samt att identifiera egenskaper, problem och frågeställningar till följd av omställningens krav och osäkerheter i syfte att möjliggöra för respektive systemägare att försöka hitta lösningar på. Dessa lösningar kan innebära allt från ändring av operativ planering och styrning, till förändring av fasta och rörliga systemkomponenter eller till och med stora och små förändringar av utformningen/prissättningen av tjänsteutbudet. Modelleringsansatsen medger en iterativ analysprocess där förslag på lösningar på identifierade problem kan utvärderas i den virtuella miljön. Detta genererar praktisk tillämpningsbara kunskaper som är nödvändiga för de transportproducerande företags förmåga till en snabb omställning till elektrifierade långväga godstransporter.

Nedan redovisas exempel på resultat i syfte att illustrera hur en huvudstudiemodell (HSM) kan utformas och användas för att utforska de logistiska konsekvenserna av elektrifieringen av det vägburna svenska godstransportsystemet. Sist i avsnittet följer en diskussion på hur en HSM bör konstrueras och användas för att kunna besvara frågorna om hur speditörer, åkare och varuägare påverkas av en snabb elektrifiering och hur dessa ska kunna hantera dessa konsekvenser på ett kostnadseffektivt sätt och utan stora störningar av systemets prestanda.

### 4.1 Illustration av föreslagen metodik

Genom att konfigurera den framtagna exekverbara simuleringsmodellen kan olika scenarion utvärderas i jämförande analyser. Scenarion kan variera i systemupplägg, operativ styrning, tjänstekvalitet etc. Jämförande analyser bidrar till att skapa viktiga insikter om hur förändring i olika systemkomponenters egenskaper påverkar systemprestandan. Dessa insikter utgör kunskapsbasen på

vilken nyckelaktörer kan basera kritiska beslut beträffande hur en omställning till elektrisk framdrivning kan ske och till vilken kostnad. Slutligen kan olika framtagna strategier utvärderas i den virtuella modellen innan slutgiltigt beslut och implementering.

De nedan presenterade resultaten är baserad på modellkörningar som simulerar ca en månads operationer (20 iterationer). Modellen i det här utförandet inkluderar endast långväga transporter i ett paket- och stycke gods nätverk, d.v.s. att första- och sistamilens insamling/distribution av försändelserna är exkluderade. Dessa är dock kritiskt viktiga att inkludera i en HSM. Att körningarna består av flera iterationer möjliggör framtagning av beskrivande statistik för varje ut-parameter. Dock väljer vi att avstå från att redovisa dessa nedan för att inte ge sken av exakthet som i det specifika sammanhanget inte är meningsfull.

Inför varje iteration av modellkörningen, genereras transportefterfrågan i nätverket. Komponenters egenskaper, operativstyrning till exempel ruttnings-/laddningsstrategin, penetrationsgraden av elektrifiering i nätverket m.m. ändras inte mellan olika iterationer. Modellen har inget ”minne” d.v.s. att varje iteration startar i samma systemtillstånd: känt total transportefterfrågan för dagen samt tillgång till tillräckligt många lastbilar i varje nod. Varje iteration slutförs med att dokumentera ut-parametrarna samt ”nollställa” systemet. Efter avslutat körning samlas data från samtliga iterationer i en utdatafil för vidare analyser.

Nedan presenteras resultat från jämförande analyser av i huvudsak tre olika scenarion: ett basscenario med endast konventionella diesellastbilar, ett elektrifieringsscenario med endast stationär laddning samt ett elektrifieringsscenario som innehåller både elvägar och stationärladdning. Elektrifieringsscenarion konfigureras med olika penetrationsgrad och elektrifieringsscenariot som innehåller elvägar kan styras med olika ruttningsstrategier.

#### 4.1.1 Huvudkonfiguration av modellen för olika scenarion

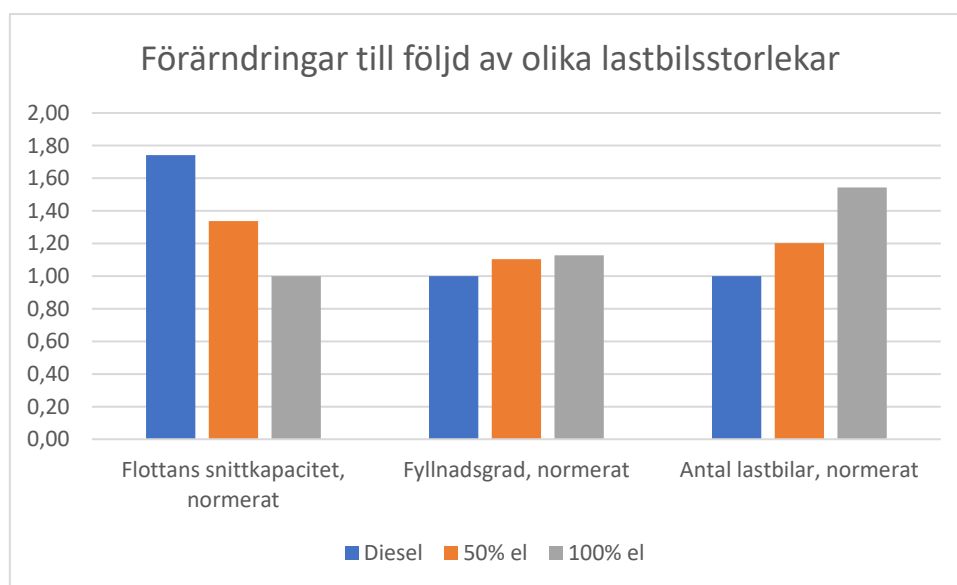
I scenarion för elektrifiering görs det ett antagande att el-lastbilarna kommer att ha en mindre lastkapacitet än konventionella diesellastbilar i liknande trafik. Antagandet är baserat på det faktum att skalfördelar realiseras av att nyttja de största enheter som man kan fylla i sitt nätverk. Tunga lastbilar med 47 ton lastkapacitet är vanliga i den modellerade fjärrtrafiken. Dock är de största el-lastbilar som finns idag inte fullt så stora. Därför har el-lastbilarna i elektrifieringsscenarion endast 27 ton lastkapacitet. Detta motsvarar 60- respektive 40-ton lastbilar i de olika segmenten. Skillnaden i lastkapacitet leder till vissa mekaniska effekter som behövs beaktas i analyserna. De relativt mindre el-lastbilarna leder till att antalet lastbilar i systemet ökar i takt med att penetrationsgraden för elektrifiering ökar.

Snitthastigheten för den effektiva körtiden är satt till 75 km/h. Elektrifieringsscenarion kan konfigureras i en kontinuerlig skala från 0-1 beträffande graden av elektrifiering i systemet: där 0 innebär endast konventionella lastbilar (d.v.s. identiskt med basscenariot) och 1 betyder 100% elektrifiering. Graden av elektrifiering kan varieras, men för tydlighets skull är endast tre konfigurationer presenterade nedan: ingen elektrifiering, 100% elektrifiering och 50% elektrifiering. Resultaten är också presenterade för de två olika ruttnings-/laddningsstrategier. Dessa är (a) kortaste vägen: där el-lastbilar åker den kortaste vägen mellan avgångs- och ankomstnoden och (b) minst antal stopp: vilket innebär en strategi att minimera behovet av stillastående laddning genom att försöka nyttja underfärdladdning i så stor utsträckning som möjligt även om detta skulle innebära en omväg. Detta är naturligtvis bara aktuellt för det elektrifieringsscenario som innehåller elvägar. För modellkonfigurationer som innebär endast konventionella diesellastbilar eller endast stationärladdning är ruttningsalternativet ”minst antal stopp” ingen alternativ. Att i stället för en a priori satt

ruttningsheuristik haft möjlighet att implementera en optimeringsmodul hade varit att föredra, men det är något som inte rymdes i FSM och som bör utvecklas i en HSM.

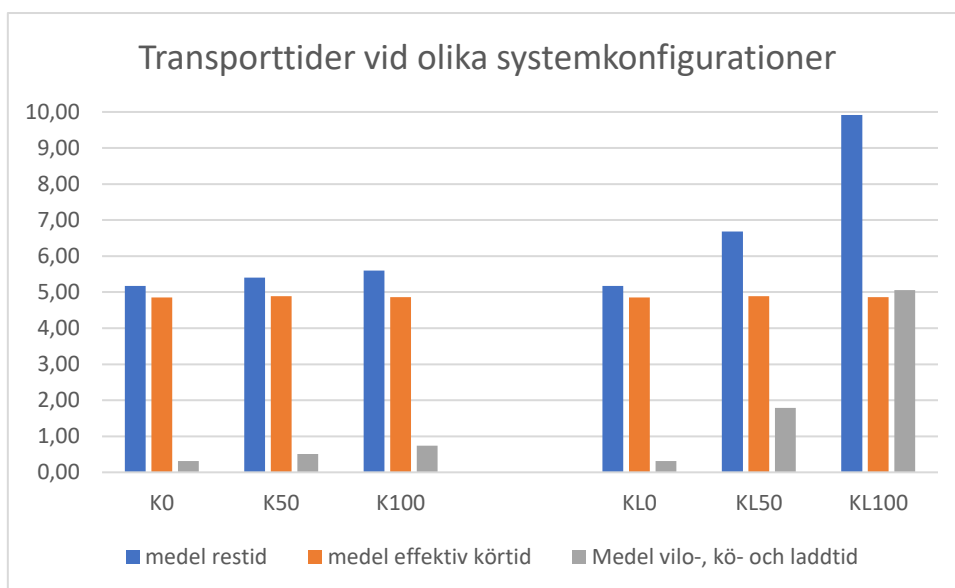
#### 4.1.2 Scenarijämförelse – basscenario och elektrifiering med/utan elvägar

Den totala transporttiden i nätverket per dag skiljer sig emellan olika konfigurationer beträffande elektrifieringens penetrationsgrad och tillgången till elvägar eller ej. Ökad elektrifiering leder till fler fordon i nätverket som en mekanisk effekt av att elbilarna i modellen har lägre lastkapacitet och därmed ökad total körtid (d.v.s. summan av körtiden för samtliga lastbilar i nätverket). Ökningen av antalet el-lastbilar visar sig dock vara proportionerligt mindre än skillnaden i lastkapacitet i och med att mindre enheter möjliggör högre fyllnadsgrad på systemnivå. Det innebär i det här fallet att diesellastbilar i modellen har ca. 75% högre lastkapacitet än el-lastbilarna, men antalet lastbilar i en helelektrifierad konfiguration av modellen är endast ca. 50% fler (Figur 3). Förändringen i flottans snittlastbilskapacitet, antal lastbilar och fyllnadsgrad är normerade för ökad tydlighet.



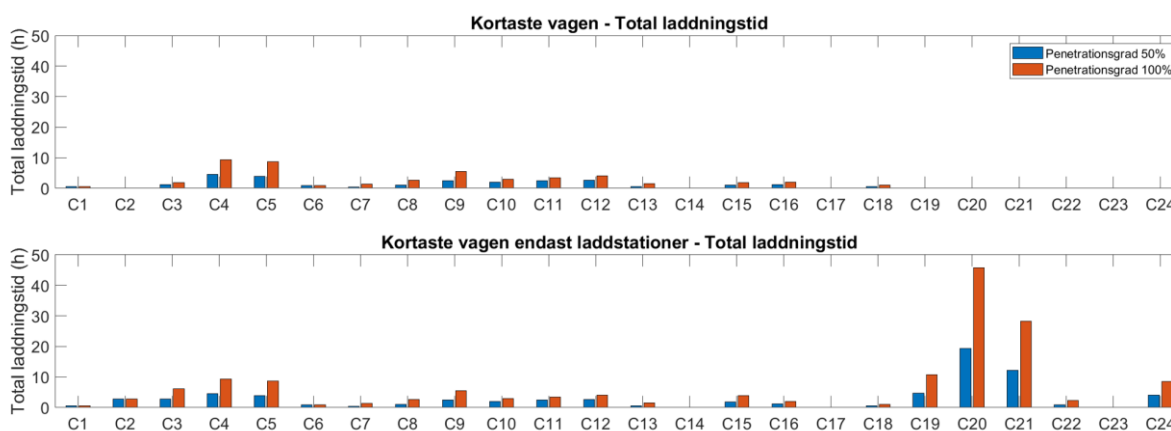
Figur 3 förändring av flottans snittlastbilskapacitet, antal lastbilar och fyllnadsgrad i lika modellkonfigurationer (normerat)

Dessutom innebär elektrifiering längre transporttider terminal till terminal – tack vare stillastående laddning och eventuellt väntetid för att få tillgång till en ledig laddningsstation. För att tydligt illustrerar effekten av elektrifieringen på transporttiden, trots att den totala körtiden i nätverket ökar tack vare el-lastbilarnas lägre lastkapacitet, redovisas genomsnittstider för effektiv körning, transporttid samt vilo-, laddning- och väntetider i nätverket i Figur 2. Beteckningen K0/50/100 anger konfigurationer med 0/50/100% elektrifiering i ett nätverk som innehåller elvägar enligt (Figur 4) och KL0/50/100 betecknar motsvarande konfigurationer i ett nätverk med endast stationär laddning. Enskilda resor/relationer kan isoleras i modellresultatet för fördjupad analys.



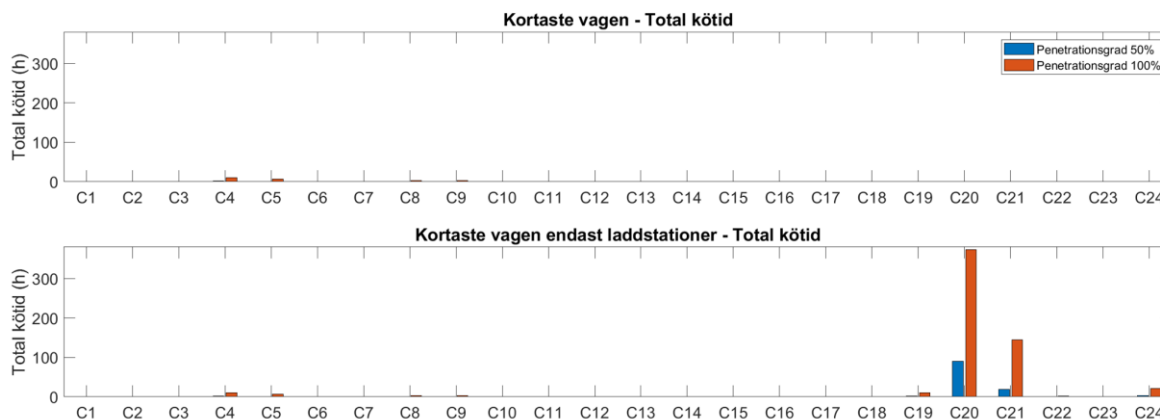
Figur 4 Snitt transporttid, effektivkörtid och vilo-, kö- och laddtid för olika modellkonfigurationer. K0/50/100 respektive KL0/50/100 betecknar 0/50/100% elektrifiering i konfigurationer med respektive utan elvägar.

Vidare, framgår det av Figur 4 att den genomsnittliga totaltransporttiden är jämförbart mellan det elektrifierade scenariot och basscenariot i fallet där både elvägar och stationär laddning finns att tillgå. Samtidigt som att elektrifiering med endast stationära laddningsstationer leder till kraftig ökning av genomsnittrestiden.



Figur 5 Total laddningstid per laddningsstation. Övre diagram betecknar elektrifierad nätverk md elvägar och nedre diagram betecknar motsvarande nätverk utan elvägar.

I elektrifieringsscenariot med endast stationär laddning, d.v.s. utan tillgång till elvägar, ökar det totala behovet av batteriladdning i nätverket. Dock blir det tydligt av Figur 5 att majoriteten av det nya laddningsbehovet är koncentrerat till två laddningsstationer som i sin tur leder till kraftig trängsel med långa kötider för att kunna ladda (se Figur 6). Flaskhalsen som uppstår vid laddningsstationerna C20 och C21 förklarar så gott som hela skillnaden i restid som uppstår mellan de olika elektrifieringsscenariot. Det totalt ökade behovet av laddning skulle inte lett till så stora skillnader i restid om det behovet hade varit jämnare distribuerat i nätverket.



Figur 6 Total kötid per laddningsstation. Övre diagram betecknar elektrifierad nätverk md elvägar och nedre diagram betecknar motsvarande nätverk utan elvägar.

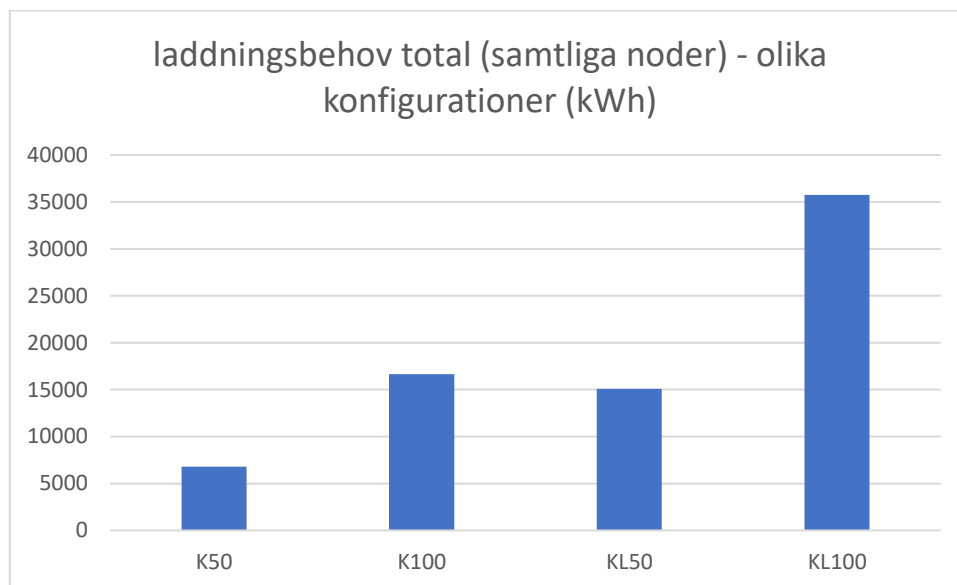
En relevant fråga som bör beaktas i ljuset av den längre transporttiden, är hur detta påverkar leveransprecisionen d.v.s. hur längre transporttid mellan terminalerna påverkar totala transporttiden dörr till dörr. I FSM ingår inte första- och sista milen därför är andel ankomster i tid till terminal använt här som ett mått på leveransprecision (se Tabell 3). Leveransprecisionen av elektrifieringsscenariot med elvägar är jämförbart med basscenariot. Majoriteten av ankomstförseningarna rör sig om mindre än en halvtimme och genomsnittsförseningen dras upp av förseningar upp till två timmar i noden S3.

Tabell 3 Sammanställning av leveransprecision. K0/50/100 respektive KL0/50/100 betecknar 0/50/100% elektrifiering i konfigurationer med respektive utan elvägar

	Antal avgångar	Antal försenade ankomster	Snittförsening (h)	Leveransprecision
K0/KL0	94	0	0	100%
K50	113	3	0,5	97%
K100	144	9	1,2	94%
KL50	113	18	5,8	84%
KL100	144	52	9,8	64%

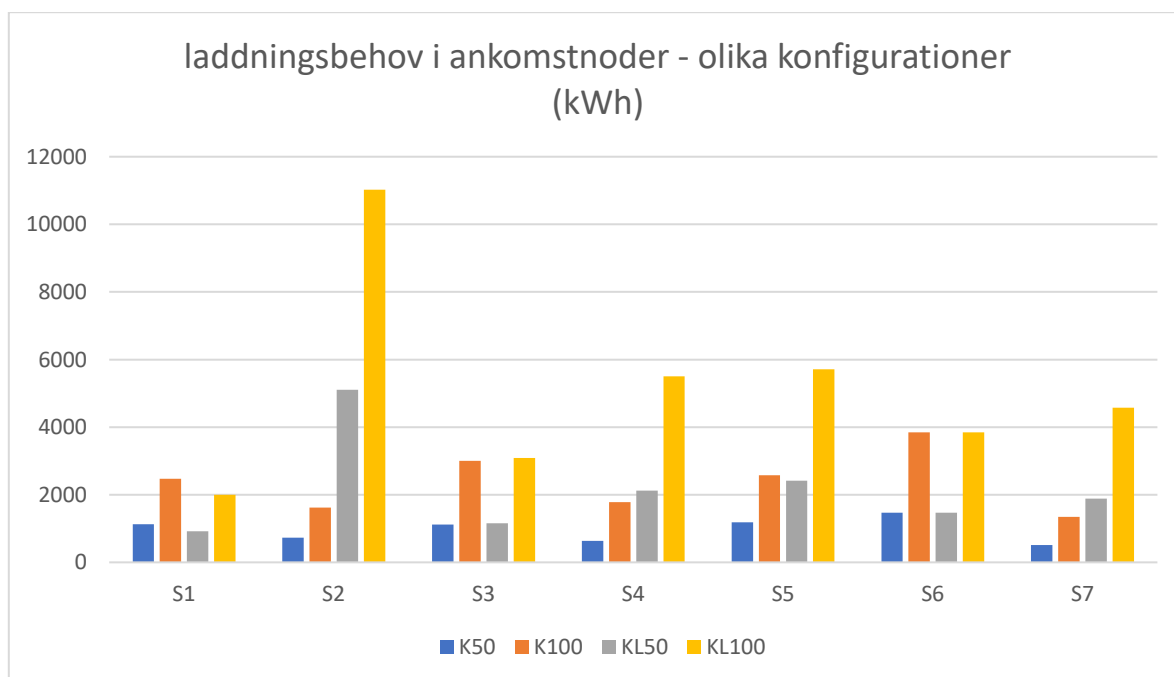
Samma mönster syns i elektrifieringsscenarion utan elvägar. Dock påverkas fler noder av flaskhalsen som uppstår vid laddningsstationerna C20 och C21 och leder till en kaskadefekt av kraftiga förseningar (10-20 h) i 5 av 30 relationer. I övrigt är förseningarna inom spannet av 1-2 timmar vilket torde vara hanterbart genom operativa modifieringar medans de kraftiga förseningarna som drar upp snittet, behöver mer långtgående åtgärder för att elimineras.

De olika elektrifieringsscenarion, med eller utan elvägar och givet nätverkskonfigurationer med olika penetrationsgrad, påverkar också effektbehovet i noderna för laddning av fordonen. I Figur 7 redovisas det totala effektbehovet i noderna i nätverket för olika elektrifieringsscenarion och nätverkskonfigurationer och i Figur 8 redogörs samma sak uppdelat per nod.



Figur 7 Total laddningsbehov för samtliga noder i nätverket för olika konfigurationer. K50/100 respektive KL50/100 betecknar 50/100% elektrifiering i konfigurationer med respektive utan elvägar.

Att effektbehovet i nätverkets noder är störst i elektrifieringsscenario utan elvägar är föga förvånande. Lika så att noder med störst mängd trafik och/eller noder som ligger längs den tilltänka elvägsstråken påverkas mest beträffande effektbehov vid terminalen, när man jämför elektrifieringsscenario med och utan elvägar.

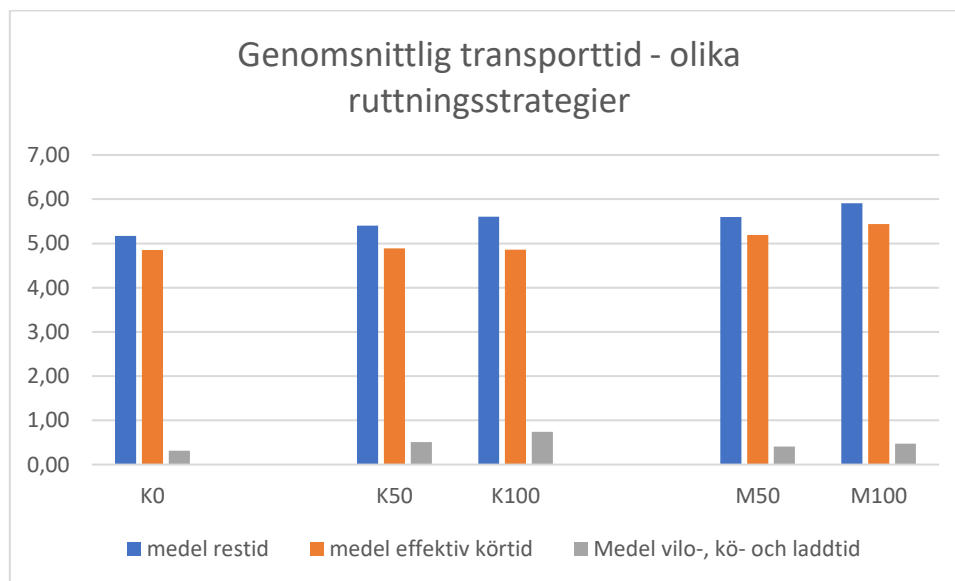


Figur 8 laddningsbehov i nätverkets noder för olika konfigurationer. K50/100 respektive KL50/100 betecknar 50/100% elektrifiering i konfigurationer med respektive utan elvägar.



### 4.1.3 Scenariojämförelse – olika ruttning-/laddningsstrategier

I brist på en ruttoptimeringsmodul i FSM är en enkel ruttningshuristik framtagen i illustrativt syfte. Detta är endast tillämpligt i elektrifieringsscenariot med elvägar då i övriga scenarion är kortaste vägen ruttning det självklara alternativet. Ruttningalternativen som ingår i scenarioanalysen är ”kortaste vägen”, d.v.s. att lastbilar tar den kortaste vägen till sin destination och ”minst antal stopp” vilket innebär att i de relationer där det är möjligt att ta en omväg för att kunna nyttja underfärdsladdning på de elektrifierade stråken, gör man det i syfte att minimera behovet av stationär laddning. Hur avvägningen mellan längre effektiv körtid med eventuell tillkommande längre vilotid å ena sidan och längre tid för laddning eller kö till laddningsstation ser ut är inte givet.

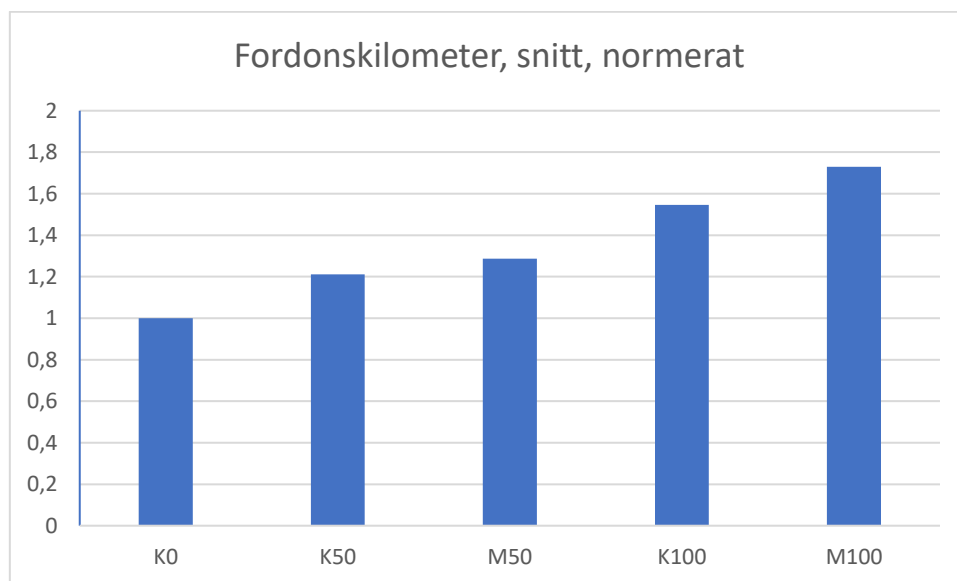


Figur 9 Snitt transporttid, effektivkörtid och vilo-, kö- och laddtid för olika modellkonfigurationer. K0/50/100 respektive M50/100 betecknar 0/50/100% elektrifiering där K är ruttningalternativet kortaste vägen och M minst antal stopp.

I Figur 9 redovisas hur genomsnittlig transporttid, effektiv körtid samt vilo-, kö- och laddningstid skiljer sig mellan basscenariot och de olika ruttningstrategierna i elektrifieringsscenariot med elvägar. Skillnaden i genomsnittlig transporttid och dess ingående komponenter, mellan de jämförda konfigurationerna är inte försumbart. Detsamma gäller ruttningens effekt på genomsnittlig effektivkörtid och stillastående tid. Däremot är det värt att notera att även om strategin med minst antal stopp ger i genomsnitt längre transporttider mellan terminalerna så är dess effekt på leveransprecision, konterintuitivt nog, det omvända. Strategin med minst antal stopp ger samma leveransprecision som basscenariot (jmf. Tabell 3 ovan). Vid närmare analys av enskilda relationer, kan man tydligt se att detta förklaras av att minst antal stopp ruttningstrategin leder till en avlastning av flaskhalsar i den stationära laddningsinfrastrukturen som i övrigt förklarar de förseningar som uppstår i kortaste vägen scenariot.

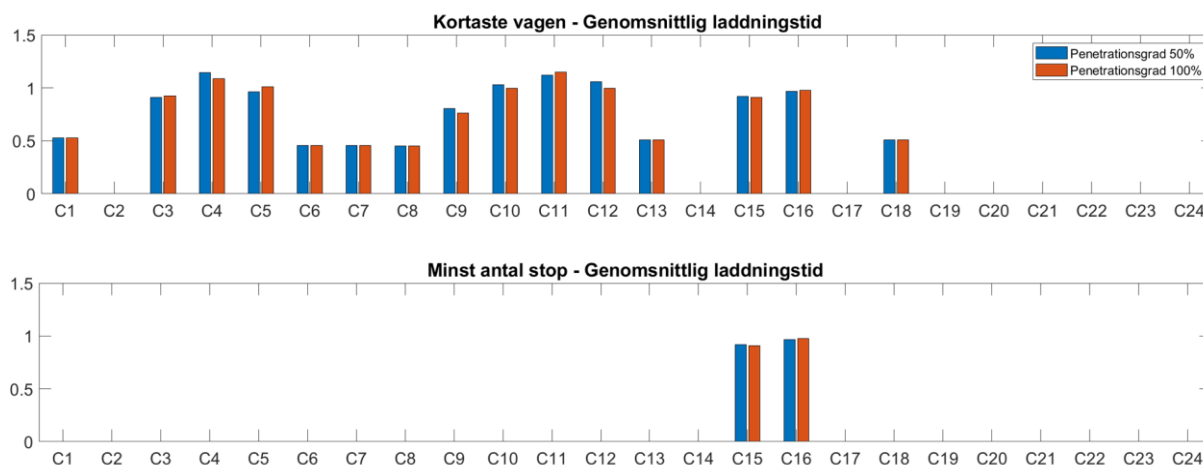
Kostanden för stillastående och rörlig tid kan inte antas vara jämförbara och eftersom dessa inte ingår i FSM, så går det inte att dra några slutsatser om ruttningstrategierna relativa kostnadseffektivitet givet uppläggets leveransprecision. Man kan dock se storleksordningen av skillnaden i total effektiv körtid mellan de olika konfigurationerna i Figur 10. I en HSM bör innehålla kostandkomponenter som är en förutsättning för att företagsekonomiskt optimera produktionssystemet. Man kan från Figur 10 konstatera att det rör sig om storleksordningen 10-20% längre körsträcka i fallet med minst antal stopp jämfört med kortaste vägen beroende på graden av elektrifiering (50/100). Övriga skillnader i total

antal fordonskilometrar mellan basscenariot och elektrifieringsscenario förklaras av den mekaniska effekten som följer el-lastbilarnas lägre lastkapacitet jämfört med konventionella lastbilar



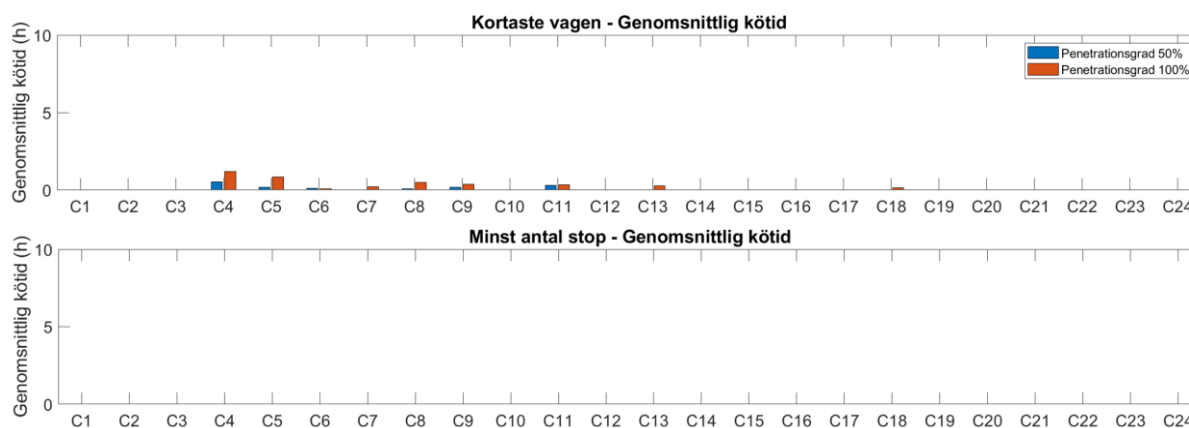
Figur 10 genomsnittlig total fordonskilometer (normerat) för olika modellkonfigurationer. K0/50/100 respektive M50/100 betecknar 0/50/100% elektrifiering där K är ruttalternativet kortaste vägen och M minst antal stopp.

I Figur 11 som redovisar genomsnittlig laddtid per laddningsstation för olika ruttalternativ och Figur 12 som redovisar motsvarande beträffande genomsnittlig kötid kan man se effekten av ruttstrategierna på den stationära laddningsinfrastrukturen. Detta är också illustrativt beträffande det kontreintuitiva resultatet ovan där strategin med minst antal stopp leder till i längre genomsnittstransporttider jämfört med kortaste vägen, men leder ändå till högre leveransprecision.



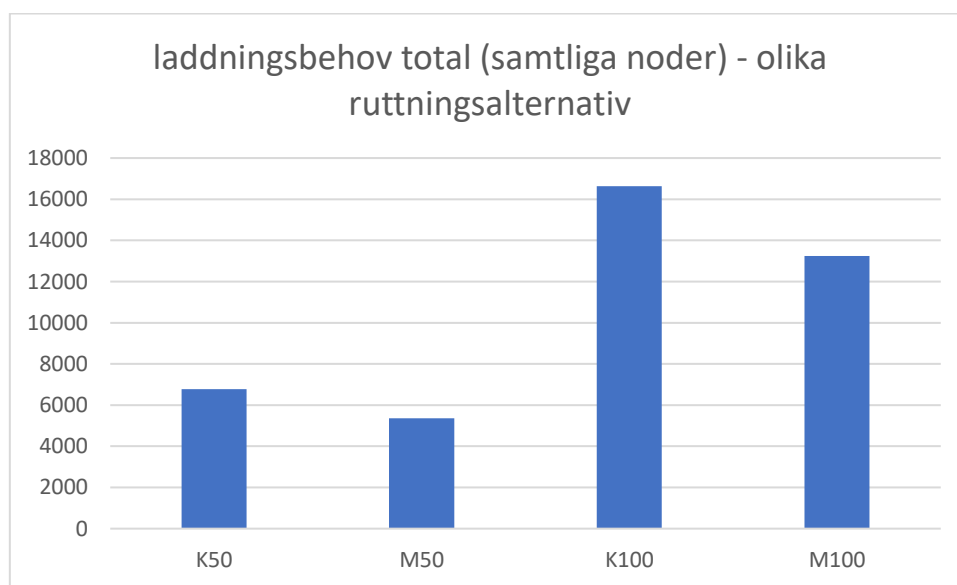
Figur 11 Genomsnittlig laddningstid per laddstation för olika ruttalternativ.

När på två laddningsstationer (c15 och C16) absorberas laddningsbehovet i hela nätverket för stationär laddning av de elektrifierade stråken. Effekten för leveransprecisionen är även större när man beaktar att detta samtidigt eliminerar kötider och flaskhalsar vid noderna för laddning.



Figur 12 genomsnittliga kötid per laddstation för olika ruttningalternativ.

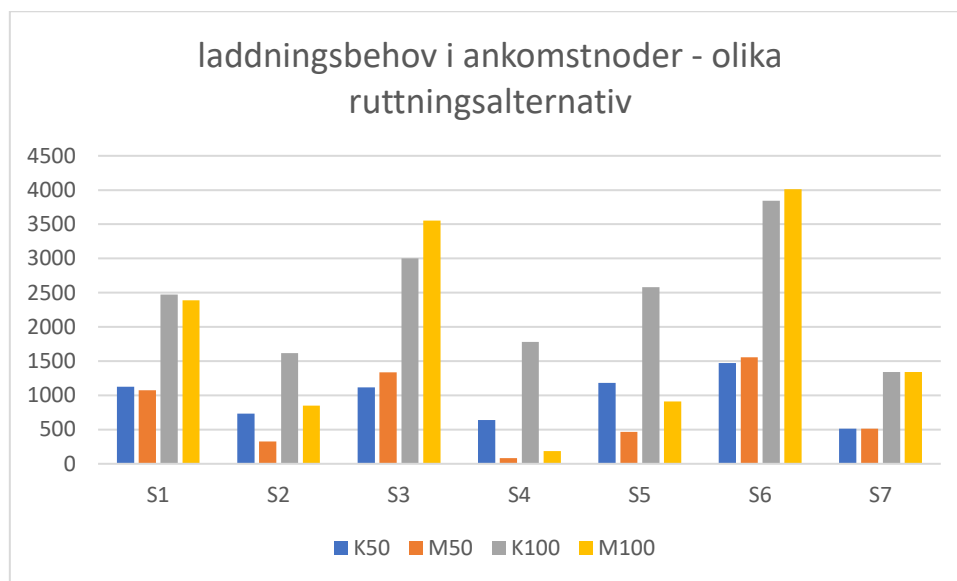
Maximal nyttjande av de elektrifierade stråken genom ruttningstrategin ”minst antal stopp” syns även på det genomsnittliga behovet av laddning vid destinationsnoderna (Figur 13). Skillnaden jämfört med kortaste vägen är inte dramatisk, men alldeles oavsett så leder strategin till att lastbilar kommer fram med ett mindre behov av laddning.



Figur 13 Total laddningsbehov för samtliga noder i nätverket för olika konfigurationer. K50/100 respektive M50/100 betecknar 50/100% elektrifiering där K är ruttningalternativet kortaste vägen och M minst antal stopp.

Om man betraktar laddningsbehovet per destinationsnod (Figur 14) ser man att samma förhållande gäller beträffande samtliga noder utöver noderna S3 och S6 där behovet av laddning är större för minst antal stopp jämfört med kortaste vägen. Närmare analys av utdata ger vid handen att detta förklaras av en kombination av effekter. För det första är dessa noder de som ingår i relationer där ruttningen inte ändras beroende på vald ruttningstrategi eftersom i dessa relationer blir omvägen som skulle krävas för att nyttja det elektrifierade stråken, orimligt långt och därför medger heuristiken ingen ändring i ruttning. Detta syns också av det faktum att de enda laddningsstationerna som har oförändrad genomsnittlig beläggning i båda ruttningalternativen är de som betjänar dessa noder. För det andra, leder ruttningstrategin ”minst antal stopp” till diskontinuerliga effekter där flera av de relationer i vilka dessa noder ingår som får ändrad ruttning mellan de olika strategierna resulterar i att lastbilarna

slipper gör ytterligare stopp för laddning längst vägen och därför kommer fram med mer dränerade batterier än alternativet.



Figur 14 laddningsbehov i nätverkets noder för olika konfigurationer. K50/100 respektive M50/100 betecknar 50/100% elektrifiering där K är ruttningsalternativet kortaste vägen och M minst antal stopp.

## 4.2 Metodikens utveckling och tillämpning i ett huvudprojekt (HSM)

Förstudiemodellen måste utvidgas och kompletteras inom tre områden för att den resulterande huvudstudiemodellen ska vara praktiskt tillämpningsbart för det tilltänkta ändamålet: a) modellkomponenters detalj-/abstraktionsnivå, b) optimeringsmodul, samt, c) ekonomimodul. Det modellerade produktionssystemet är i vissa avseenden komplext, där effekten av olika åtgärder inte alltid är intuitivt eller analytiskt förutsägbara. Dessa egenskaper kan man tydligt se i den betydligt mer avskalade FSM som redovisas ovan som till exempel att ruttnings som innebär längre genomsnittlig transporttid har högre leveransprecision än alternativet med kortare genomsnittlig transporttid eller att en ökning i laddningsbehovet som borde rymmas inom ramen för laddningsnätverkets kapacitet leder till kaskadeffekter och diskontinuerliga hopp i utfallet som är svåra att förutsäga utan simulering.

För att kunna fånga fler relevanta detaljer och kunna genomföra fler och mer detaljerade analyser, är det viktigt att utveckla HSM beträffande ovan nämnda områden. Nedan följer en diskussion om några av de viktigaste utvecklingsområden som återstår för att skapa en validerad och ändamålsenlig huvudstudiemodell.

### 4.2.1 Modellkomponenters abstraktionsnivå

När man utvecklar en simuleringsmodell, bör ambitionen alltid vara att göra så stora förenklingar som möjligt givet modellens tilltänkta tillämpning, men inte mer. Förstudiemodellen, som inte är validerad och är framtagen i syfte att illustrera modelleringsansatsens tillämpningsbarhet är således betydligt mer avskalad än vad som motiveras för en huvudstudiemodell. Systemkomponenter som fordon, terminaler, laddningsinfrastruktur, vägnät o.s.v. är modellerade på ganska hög abstraktionsnivå (eller låg detaljnivå). I en HSM kommer samtliga dessa komponenter att behövas modelleras på betydligt högre detaljnivå.

Fordonens utformning, prestanda och tekniska egenskaper bör modelleras mer detaljrikt och med fler möjliga varianter än ovan. Detta är också nödvändig eftersom HSM kommer att innehålla fler typer av trafik än endast fjärrtrafik mellan terminaler d.v.s. första-/sista-milen insamling/distribution. Vagnätet i HSM bör bygga på den nationella vägdatan i stället för den förenklade variant som används i FSM. På samma tema behövs laddningsinfrastrukturen modelleras på en lägre abstraktionsnivå både med avseende på dess geografiska placering, kapacitet och tekniska prestanda. Terminaloperationer är modellerade som en "black-box" i FSM, men dessa kommer sannolikt att behöva modelleras mer detaljerad särskilt med tanke på att HSM kommer att innehålla både fjärrtrafik och insamling-/distributionstrafik.

Empirisk validering av HSM kommer att kräva tillgång till omfattande och varierade typer av data. En del av datan är tillgänglig genom offentliga källor som till exempel nationella vägdatan eller produktdokumentation från tillverkare/leverantörer. Andra datatyper är inte allmän tillgänglig, men bör gå att anskaffa genom att knyta till sig lämpliga partners, som till exempel data om terminaloperationer eller första-/sistamilen trafik. Ytterligare annan data kommer att inte finnas tillgängligt alls och behövs ersättas av olika typer av skattningar och känslighetsanalyser.

#### 4.2.2 Optimeringsmodul

Den enkla ruttningheuristiken i FSM visar att en viktig uppgift att studera med hjälp av modellen är avvägningar mellan olika systemegenskaper för att maximera utfallet i något avseende. Det innebär för utvecklingen av huvudstudiemodellen att den bör innehålla en optimeringsmodul.

Optimeringsmodulen kommer att möjliggöra analyser av möjliga lösningar som till exempel systemkonfigurationer, operativ styrning, ruttval, laddningsstrategier, tjänsteutbud m.m. och dess effekter på systemets utfall. Detta är värdefullt eftersom den blottlägger i detalj vilka avvägningar som är aktuella det nya elektrifierade systemet. Något som är särskilt viktigt för transportproducenterna och varuägarna.

Det nuvarande systemet är mogen med få osäkerheter och långsam förändringstakt. I ett sådant system är avvägningar mellan motstridiga systemutfall som t.ex. pris och prestanda eller effektivitet och flexibilitet etc. väl kända av båda producenter och köpare av tjänster. Elektrifiering, framför allt under själva omställningen, kommer att innebära stora osäkerheter och skillnader i teknikens prestanda hos systemets olika komponenter jämfört med dagens system. Syftet med optimeringsmodulen således inte primärt att i sig optimera ett visst utfall, utan genom optimering av olika dimensioner blottlägga och skapa nya värdefulla insikter om de nya avvägningarna som det elektrifierade systemet kommer att innebära för producenter och köpare av transporter i första hand och systemkomponentsutvecklare/-tillverkare och infrastrukturdito i andra hand.

#### 4.2.3 Ekonomimodul

Fördelen med monetära analysenheter är att det möjliggör en sammanvägning av in- och utvariabler vilkas fysikaliska enheter inte är kompatibla med varandra. Däremot kan det generellt finnas en fördel i att fokusera på fysikaliska analysenheter och att avgränsa sig från monetära enheter när man studerar ett transportsystems prestanda. Om man till exempel är intresserad av att studera transporteffektivitet eller ett systems energieffektivitet, kan inkluderingen av pekuniära analysenheter bidra till att dölja den effekt som man är intresserad av mer än att belysa den.

I det här specifika fallet däremot finns det flera skäl att inkludera en modul i modellen som har ekonomiska analysenheter. Flera av de nya komponenterna som kommer att modelleras är förknippade med stor osäkerhet kring dess kostnader, kostnadskomponenter och -drivare. Det, kombinerat med att

studien genomförs ur transportproducenter och -köparens perspektiv, motiverar att i vart fall inkludera en ekonomimodul i modellen.

Dessutom kan det vara motiverad att analysera och optimera för kostnader då flera av avvägningarna mellan till exempel olika strategier för lagring- och överföring av el där de tekniska analysenheterna är till synes kompatibla med varandra men olika komponenters kostandnivåer, -komponenter och -drivare skiljer sig åt, väsentligt. Genom att kostnadsoptimera olika scenarion skapar man möjligheter för att hitta samband och avvägningar som på förhand är väldigt svåra att analytiskt identifiera. Till exempel så ser man i FSM att ruttningsalternativ som innebär längre restider bidrar till högre leveransprecision, mindre laddningsbehov på snabbbladdningsstationer, i de flesta fall lägre behov av laddning i destinationsnoderna men högre total energiförbrukning. Det är, även i detta förenklade illustrativa modell mycket svårt att analytisk göra avvägningar om vilken angreppssätt är att föredra ur olika aktörers perspektiv. Men genom att kunna kostnadsätta och kostnadsoptimera systemet så skulle dessa avvägningar analyseras med tydligare, mer användbara resultat.

#### 4.2.4 Avslutande reflektioner kring modelltillämpning

Resultat från simulering av olika scenarion i en empirisk validerad huvudstudiemodell kommer att skapa beskrivande statistik av tillräckligt hög kvalitet för att möjliggöra genomförande av beskrivande och förklarande analyser av hur dynamiken i den nya elektrifierade systemet ser ut ur ett logistikperspektiv, med andra ord, elektrifieringens logistiska konsekvenser. Utöver det, kommer optimeringsmodulen och ekonomimodulen möjliggöra ytterligare analyser för att identifiera och kvantifiera olika avvägningar som den nya dynamiken ger upphov till. Den här typen av resultat är värdefulla nog för de tilltänkta avnämarna för att motivera framtagandet av huvudstudiemodell och genomförande av en huvudstudie.

Den stora fördelen med att ta fram en sådan modell är dock att den möjliggör att till en låg kostnad genomföra många what-if-analyser och utvärderingar på potentiella lösningar för att åtgärda identifierade oönskade effekter, utöver det rent beskrivande och förklarande. Som ett illustrerande exempel, så upptäcker man i ett av de testade scenarion i FSM att diskontinuerliga kaskadeffekter leder till en oproportionerlig försämring av systemets prestanda p.g.a. uppkomsten av två flaskhalsar i nätverket. I en HSM skulle man kunna testa och utvärdera olika lösningar i en iterativ process och från olika aktörers perspektiv som till exempel utbyggnad av laddningskapacitet i flaskhalsen, alternativa ruttval, reviderad tjänsteutbud, specialfordon i den berörda trafiken, etc. Kombinationen av att kunna beskriva och analysera olika systemdesign, beskriva och förklara systemdynamiken tors stora avgörande osäkerheter och komplexitet samt möjlighet att testa och utvärdera potentiella lösningar på identifierade oönskade effekter gör att den här modelleringsansatsen är särskild väl lämpad för det frågebatteri som har identifierats som intressant att studera i en huvudstudie.

## 5 Nyttiggörande och nästa steg

I den här förstudiens illustrerar vi en metodik för att studera vilka logistiska konsekvenser olika teknikval för elektrifiering av det svenska godstransportsystemet för långväga vägtransporter innebär för produktionssystemet av transporttjänster. Med produktionssystem avses system i vilken godstransportsystemets infrastruktur och komponenter omsätts för att producera transporttjänster. Logistiska konsekvenser avser förändringar i design, styrning, drift, optimering och prestanda av produktionssystemet som följer elektrifieringens påverkan på godstransportsystemets randvillkor, egenskaper och kapabiliteter. Metodiken som illustreras visar hur scenarion om olika tänkbara

teknikmixer i den framtida elektrifierade vägtransportsystemet för långväga godstransporter kan modelleras i syfte att kunna analysera effekten av olika elektrifieringsscenarion.

Målet med förstudien är att, genom metodutveckling för dynamisk scenariomodellering och analys, möjliggöra framtagning av verktyg för att bidra till att överbrygga den kunskapslucka som idag finns beträffande de logistiska konsekvenserna av elektrifiering framför allt ur speditörer, åkerier och varuägares perspektiv. Analysmetodiken som tas fram är ämnad att skalas upp i ett huvudprojekt så att nyttan ska kunna realiseras av samhällets aktörer. Ett ytterligare syfte med förstudien är också att demonstrera hur den föreslagna modelleringsansattasen kan omsättas för kostnadseffektivt genomförande av för den snabba omställningen, nödvändiga systemanalyser.

Förstudiens resultat består av en beskrivning av metoder och modeller för scenariomodellering för elektrifiering som möjliggör analyser av de logistiska konsekvenserna av olika scenarion för respektive aktörsgrupp. Detta för att i ett huvudprojekt kunna ta fram bl. a. ny kunskap om hur randvillkoren för det operativa produktionssystemet förändras, till vilken effekt och vilka nya överväganden som måste ingå i design och operation av befintliga produktionssystem i olika framtida elektrifieringsscenarion. Den föreslagna metodiken möjliggör också jämförande analys och utvärdering av alternativa systemupplägg beträffande teknikmix, design, prestanda, planering och styrning samt operationer.

Under projektens gång har flera studier, utredningar och regeringsuppdrag påbörjats eller avslutats som helt eller delvis handlar om elektrifiering av långväga vägtransporter. Dock är användarperspektivet, d.v.s. transportproducenternas och transportköparnas perspektiv, i analyser där man betraktar hur produktionssystemet för transporter påverkas, inte haft en central roll i någon av dem. Den identifierade kunskapsluckan återstår alltså och blir tilltagande angelägen i takt med omställningstempot ökar samtidigt som de identifierade osäkerheterna kvarstår. Förstudien illustrerar hur den valda metodiken möjliggör kostnadseffektiv och ändamålsenliga dynamiska analyser av tänkbara utvecklingsscenarion som bidrar till en kunskapsutveckling som underlättar hanteringen av effekterna av reella, avgörande osäkerheter, under en snabb omställningsprocess, av systemets nyckelaktörer.

Förstudiens resultat tydliggör de identifierade frågeställningarna samt visar att den föreslagna metodiken är ändamålsenlig och genomförbar. Den framtagna modellen och dess resultat i sig är inte användbara eftersom modellen är framtagen i illustrativt syfte och är inte empirisk validerad. Det innebär att det mest effektiva nyttiggörandet av förstudiens resultat kommer att realiseras inom ramen för ett eventuellt huvudprojekt. Avsikten är att bygga ett relevant konsortium och inkomma med en ansökan för ett huvudprojekt i nästa utlysningssomgång av Triple F.

## 6 Diskussion

Den snabba utvecklingen inom elektrifieringen av transportsystemet och kraven på snabb omställning till fossilfrihet innebär ett stort behov av kunskap i närtid för att möjliggöra implementering i den takt som krävs. Särskilt logistiska aspekter och elektrifiering av godstransportsystemet ur ett användarperspektiv har hittills inte berörts i tillräcklig utsträckning i den befintliga litteraturen. Kraven på omställningstempot innebär också att många olika tekniker utvecklas samtidigt och det råder stora osäkerheter kring vad de olika alternativen kommer att innebära för utformning av och funktionalitet i användarnas system. Användarna representeras främst av speditörer, åkerier och varuägare som utformar och utför transporttjänster och/eller har ett transportbehov i sin verksamhet. Beslut om utveckling, implementering och teknikval i avgörande avsnitt som infrastruktur, tekniska komponenter



som fordon och energilagring- och distributionssystem för energiförsörjning ligger utanför användarnas rådighet. Detta i sin tur leder till att ytterligare ökar osäkerheterna och agerar som ett effektivt hinder för snabb, storskalig elektrifiering av det långväga godstransportsystemet för vägtransporter.

Osäkerheten som utgör ett hinder för ett snabbt omställningsförlopp till elektrifiering för speditörer och åkerier härstammar delvis från att det fortfarande är oklart vilka tekniker som kommer att få genomslag. Teknikutvecklingstempot inom området är högt. Det innebär behov av dynamiska analysverktyg som snabbt kan anpassas för analyser med hänsyn till nya tekniska förutsättningar. Simulering av produktionssystem för transporttjänster i den nya kontexten som elektrifiering och olika teknikval skulle innebära skapar möjlighet till bättre beslutsunderlag för nödvändiga investeringar och systemförändringar. Detta skulle minska riskerna i omställningen och möjliggöra snabb och kostnadseffektiv tillämpning av nya tekniker på systemnivå.

Kunskap om de logistiska konsekvenserna som olika tekniker, eller kombination av tekniker för elektrifiering av det svenska godstransportsystemet för vägtransporter innebär för speditörer, åkerier och varuägare är helt avgörande för hur dessa aktörer kan utveckla genomförbara strategier för en snabb och effektiv omställning. På samma sätt är dessa kunskaper nödvändiga för infrastrukturförhållare, teknikleverantörers och andra beslutsfattare vid utvärdering av de olika tekniska alternativen. En fullskalig och validerad simuleringsmodell enligt den framtagna metodiken kan också tillämpas för att utveckla underlag som infrastrukturförhållare, policymakare och teknik- och tjänsteleverantörer behöver för att möjliggöra snabb och kostnadseffektiv omställning som säkerställer att de transportpolitiska målen uppnås.

Den här förstudien illustrerar en metodik för att modellera realistiska scenarion om olika tänkbara teknikmixer i den framtida elektrifierade vägtransportssystemet för långväga godstransporter. Metodiken möjliggör framtagning av ändamålsenliga modeller för att analysera de logistiska konsekvenserna av olika elektrifieringstekniker ur speditörer, åkerier och varuägares perspektiv. Dessa kunskaper är nödvändiga för att kunna ta fram beslutsunderlag för teknikval, investering- och omställningsbeslut som möjliggör en kostnadseffektiv och framgångsrik utformning och implementering av åtgärder som möjliggör omställning till fossilfria godstransporter. Transportsystemets effektivitet spelar en avgörande roll för den svenska industrins konkurrenskraft vilket gör bibehållen/ökad prestanda och kostnadseffektivitet under och efter omställningen kritiskt viktigt.

En sådan validerad simuleringsmodell bör utvecklas inom ramen för en huvudstudie som baseras på den här förstudiens resultat. En fullskalig simulering av scenarion i en validerad modell baserad på relevant empirisk indata skulle möjliggöra att utveckla beslutsunderlag med flera målgrupper. Sådana modellkörningar, framgångsrikt genomförda, skulle innebära möjligheter att skapa insikter om systemdynamiken samt underlag för beslut för såväl utformning av förutsättningar för som produktionssystemen i sig. Besluten som omställningen rör t.ex. som systemdesign, tjänsteutformning, operativ planering och styrning samt realistiska skattningar om hur stora insatser som behövs för transportproducenterna att ställa om sina operationer till elektrisk drift givet olika yttre förutsättningar som den tekniska utvecklingen av systemkomponenter och infrastruktur. Den nya kunskapen möjliggöra också för samma aktörer att kunna på ett företagsekonomiskt kostnadseffektivt sätt hantera de stora osäkerheterna som alltså omger den snabba omställningstempot utan att behöva inta en ”vänta-och-se” inställning eller en ”köra-på-blint” dito; där den tidigare riskerar att försena måluppfyllnad medan den senare riskerar kostsamma felinvesteringar. Detta är en förutsättning för en



storskalig omställningen av det svenska transportsystemet till fossilfridrift inom av uppsatta mål angivna tidsramar.

På samma sätt kommer kunskapsunderlaget att möjliggöra för transportköpare att kunna utvärdera rollen som elektrifierade, långväga vägtransporter kommer att kunna spela för dem samt hur olika omställningsalternativ kommer att påverka deras interna planering och styrning. Slutligen kommer komponenttillverkare och infrastrukturhållare att ha glädje av välunderbyggda och realistiska insikter som har skapats ur användarledets perspektiv beträffande deras respektive processer för utvecklingen av sina respektive verksamhetsområden. Sammantaget kommer detta att på ett icke försumbart sätt att bidra till att möjliggöra en högre omställningstakt som krävs för att uppfylla de transport-, klimat- och miljöpolitiska målen och samtidigt bidra till att omställningen kan genomföras på ett samhällsekonomisk effektivt sätt och utan försämrad konkurrenskraft för svensk näringsliv eller tillgänglighet för samhället i övrigt.

## Referenslista

- ABRAHAMSSON, M. 2013. Logistik för ökad svensk konkurrenskraft : Forsknings- och innovationsagenda för framtidens logistik. Linköping: Linköping University Electronic Press.
- ANDERSSON, L., SKALLEFELL, P., SKJUTAR, K. & ARFWIDSSON, V. 2018. Affärsmodeller och finansiering för utbyggnad av elvägar i Sverige. Trafikverket/EY.
- ANDERSSON, L., SKALLEFELL, P., SKJUTAR, K., SUKO, E. & ARFWIDSSON, V. 2019. Roller, aktörsrelationer och risker på elvägsmarknaden. EY/Trafikverket.
- ARNÄS, P. O., HOLMSTRÖM, J. & KALANTARI, J. 2013. In-transit services and hybrid shipment control: The use of smart goods in transportation networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 36, 231-244.
- BANKS, J. 1998. Principles of Simulation. In: BANKS, J. (ed.) *Handbook of Simulation - Principles, Methodology, Advances, Applications and Practice*. New York, NY: John Wiley & Sons, Inc.
- BÖRJESSON, M., JOHANSSON, M. & KÅGESSION, P. 2020. Samhällsekonomiska kalaktyler för elvägar. *Working papers in Transport Economics*. Statens väg- och transportforskningsinstitut.
- DENYER, D., TRANFIELD, D. & VAN AKEN, J. E. 2008. Developing Design Propositions Through Research Synthesis. *Organization Studies*, 29, 393-413.
- FROGER, A., MENDOZA, J. E., JABALI, O. & LAPORTE, G. 2019. Improved formulations and algorithmic components for the electric vehicle routing problem with nonlinear charging functions. *Computers & Operations Research*, 104, 256-294.
- GOLDSMAN, D. 2007. Introduction to Simulation. In: HENDERSON, S. G., BILLER, B., HSIEH, M.-H., SHORTLE, J., TEW, J. D. & BARTON, R. R. (eds.) *Winter Simulation Conference*. Washington, DC.
- GRAUERS, A. 2019. Ellastbilaroch deras kostnader. Stockholm: Closer Round Table.
- HASSELGREN, B. 2019. Manal till företagsekonomiska kalkylmodeller för elvägar. Solna: Trafikverket.
- HOLMSTRÖM, J., KETOKIVI, M. & HAMERI, A.-P. 2009. Bridging Practice and Theory: A Design Science Approach. *Decision Sciences*, 40, 65-87.
- IEA 2019. Energy Policies of IEA Countries: Sweden 2019 Review. Paris.
- JONSSON, L. 2018. ELVÄGAR - Kostnader och effektsamband. Stockholm: WSP.
- JUSSILA HAMMES, J. 2020. Potential for Greenhouse Gas Emissions by Electrifying Freight Transport on the Swedish E-Roads. *Working Papers in Transport Economics* Swedish National Road and Transport Research Institute
- KALANTARI, J. 2012. *Foliated Transportation Networks - Evaluating feasibility and potential*. PhD, Chalmers University of Technology.
- KLOO, H. & LARSSON, M.-O. 2019. Jämförelse av tekniker för klimatsmarta tunga godstransporter. Stockholm: IVL Svenska miljöinstitutet.
- KÅGESSION, P. 2019. Klimatmål på villovägar? En ESO-rapport om politiekn för utsläppsminskningar i vägtrafiken. *Rapport till Expertgruppen för studier i offentlig ekonomi*. Stockholm: Finansdepartementet.
- LAW, A. & KELTON, D. 2000. *Simulation Modeling & Analysis*, Singapore, McGraw-Hill.
- LIIMATAINEN, H., VAN VLIET, O. & APLYN, D. 2019. The potential of electric trucks – An international commodity-level analysis. *Applied Energy*, 236, 804-814.
- LUMSDEN, K. R. 2012. *Logistikens grunder*, Lund, Studentlitteratur.
- MORIARTY, P. & HONNERY, D. 2019. Prospects for hydrogen as a transport fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44, 16029-16037.
- NORDELÖV, A. & ARVIDSSON, R. 2019. A research agenda for life cycle assessment of electromobility. Swedish Electromobility Centre.

- OBEL, F., SAHLÉN, K. & XYLIA, M. 2020. Elektrifiering av Sveriges transportsektor. In: EDFELDT, E. (ed.). Sweco Energy.
- POHL, H., RIDELL, B., CARLSON, A., LINDBERGH, G., MARUO, K. & KARLSTRÖM, M. 2017. *Bränslecellers konkurrenskraft i vägfordon*, Stockholm, Energiforsk.
- SINGH, A. 2016. *Electric Road Systems - A feasibility study investigating a possible future of road transportation*. M.Sc., Royal Institut of Technology.
- SOU2021:48 I en värld som ställer om - Sverige utan fossila drivmedel 2040. In: UTREDNINGAR, S. O. (ed.). Stockholm.
- TAEFI, T. T. 2016. Supporting the adoption of electric vehicles in urban road freight transport – A multi-criteria analysis of policy measures in Germany. *Transportation research. Part A, Policy and practice*, 91, 61-79.
- TALJEGÅRD, M. 2019. *Electrification of Road Transportation - Implications for the Electricity System*. Ph.D., Chalmers University of Technology.
- TEOH, T., KUNZE, O., TEO, C.-C. & WNG, Y. 2018. Decarbonisation of Urban Freight Transport Using Electric Vehicles and Opportunity Charging. *Sustainability* 10, 32-58.
- TRAFIKVERKET 2017. Nationell färdplan för elvägar. Borlänge.
- TRANFIELD, D., DENYER, D. & SMART, P. 2003. Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. *British Journal of Management*, 14, 207-222.
- WOLFF, S., FRIES, M. & LIENKAMP, M. 2020. Technoecological analysis of energy carriers for long-haul transportation. *Journal of Industrial Ecology*, 24, 165-177.
- ZHANG, S., CHEN, M., ZHANG, W. & ZHUANG, X. 2020. Fuzzy optimization model for electric vehicle routing problem with time windows and recharging stations. *Expert Systems with Applications*, 145, 113123.