



Simulering av effektbehovet på industrier och terminaler vid elektrifiering av skogstransporter

Albin Werre

Examensarbete • 30 hp
Sveriges lantbruksuniversitet, SLU
Institutionen för energi och teknik
Civilingenjörsprogrammet i energisystem
Examensarbete 2023:15 • ISSN 1654-9392
Uppsala 2023



Simulering av effektbehovet på industrier och terminaler vid elektrifiering av skogstransporter

Simulation of power demand for industries and terminals in the electrification of forest transport

Albin Werre

Handledare: Anna Pernestål, Skogforsk
Bitr. handledare: Anders Eriksson, Skogforsk
Ämnesgranskare: Gunnar Larsson, SLU, Institutionen för energi och teknik
Examinator: Åke Nordberg, SLU, Institutionen för energi och teknik

Omfattning: 30 hp
Nivå och fördjupning: Avancerad nivå, A2E, teknik
Kurstitel: Examensarbete i energisystem
Kurskod: EX0724
Program/utbildning: Civilingenjörsprogrammet i energisystem
Kursansvarig inst.: Institutionen för energi och teknik
Utgivningsort: Uppsala
Utgivningsår: 2022
Upphovsrätt: Alla bilder används med upphovspersonens tillstånd.
Serietitel: Examensarbete (Institutionen för energi och teknik, SLU)
Delnummer i serien: 2023:15
ISSN: 1654-9392

Nyckelord: laddinfrastruktur, effektbehov, skogstransporter, elektromobilitet

Sveriges lantbruksuniversitet
Fakulteten för naturresurser och jordbruksvetenskap
Institutionen för energi och teknik

Abstract

In this study a discrete event-based simulation approach is used to quantify and evaluate the power need from fast charging of an electrified Swedish forest transport fleet. The simulation is done on three locations which were evaluated as likely locations of charging infrastructure, two pulp industries as well as one terminal. The power need on these locations were evaluated, as well as dimensional peak power, number of charging ports, charging times, queuing times and how much of the fleet is technically possible to electrify today.

The study shows the power need and how this varies during an average day and at which times of the day the power is likely to be high. The power peaks is shown to be likelier during the morning than in the afternoon. The study also shows that the peak power extremes, as well as the dimensional amount of charging outputs, is quite high, although there seems to be a good potential for lowering these if strategies for planning and optimization of the transport and charging pattern is applied.

Furthermore, the results in this study shows that with today's technology in battery electric trucks and charging infrastructure and no changes in the transportation pattern, a fleet of road operated forest transport vehicles can be electrified to a degree of over 60 %. In one case, where the transport conditions is even more beneficial for electrification, the degree of possible electrification seems to be as high as 75 %. Although, this only corresponds to about 50 % of the transport work of the studied fleets, 60 and 75 % is considered a high amount of trucks being electrified. If more trucks is to be electrified it is recommended to further investigate the possibility of planing and route optimizing, in order to adapt the transport pattern to the shorter ranges of the battery electric trucks and the availability of charging infrastructure.

This study is performed in cooperation with the Swedish forest industry research institute, Skogforsk, as a part of the research project *Accelerate electrification of forest transports*.

Populärvetenskaplig sammanfattning

På flera håll i landet så börjar det satsas mer och mer på elektriska fordon, inte bara elbilar utan nu också ellastbilar. Detta intresserar skogsbolag, som vill sänka sin klimatpåverkan och använda mer hållbara lösningar för sina transporter. Men de lastbilar som fraktar träden från skogen är inte helt okomplicerade att byta ut mot ellastbilar. Ellastbilarna kan inte köra lika långt som vanliga lastbilar som går på diesel, och behöver därför stanna och ladda sitt batteri ganska ofta. Eftersom det ofta är långt in i skogen och på dåliga vägar som lastbilarna ska hämta träden, så är det svårare att klara av det med en ellastbil. Dessutom så kan det få stora konsekvenser om en lastbil stannar mitt i skogen med ett urladdat batteri.

Det är därför det här exjobbet har genomförts, för att förstå bättre hur man kan bygga laddstationer på de bästa möjliga platserna, både för att undvika att lastbilen får slut på batteri i skogen, men också för att förstå hur mycket el som behövs. I den här rapporten så beskrivs effektbehovet, det vill säga den mängd el som i stunden behövs, vid laddning av ellastbilarna. Specifikt så fokuserar studien på två olika typer av platser som man tror att det är enkelt att etablera laddning på. Dels är det massaindustrier som studeras, som använder trä från skogen för att göra olika typer av pappersmassa, dels är det terminaler, som kan förklaras som ett mellanstopp i transporten mellan skogen och industri. Studien tittar på totalt två massaindustrier, varav ett som ligger i norra Sverige och ett i södra Sverige. Dessutom tittar studien på en terminal, som också ligger i norra Sverige.

Det som här visas är alltså hur elbehovet kan variera under ett typiskt dygn och vilka tider behovet är som störst. Detta är intressant att undersöka eftersom om det största behovet tidsmässigt sammanfaller med när övriga samhällets behov också är högt, kan det skapa problem i elnätet. Elnätet måste alltid vara designat för att klara av det största möjliga behovet på el för att ingen ska bli utan el. Denna studie kan delvis svara på hur stort det största elbehovet kan tänkas bli om så många lastbilar som möjligt byts ut till ellastbilar. Om man låter ellastbilar köra likadant som vanliga lastbilar kör idag, och ladda dem när de kommer till en industri eller en terminal så blir det absolut högsta effektbehovet ungefär 2 till 2,5 MW för industri och ungefär 3 MW hos terminalen.

Resultatet visar också hur många laddare som behövs på de olika platserna för att klara av det högsta elbehovet. Behovet kan bli stort i vissa perioder när det kommer många lastbilar samtidigt till platsen och vill ladda. Det är alltså av intresse att alla ska få en varsin laddare i dessa fall, eftersom det annars blir kö till laddarna vilket kan kosta mycket pengar för lastbilsoperatören. Det visar sig att det behövs mellan 6 och 10 laddare, beroende på vilken plats som studeras. Det får anses vara relativt många. Dessutom visar det sig att alla laddare inte utnyttjas så ofta. Det rekommenderas därför att fortsätta studera om det går att planera om lastbilarnas körning, så att de kan komma mer utspritt under dagen snarare än många samtidigt.

Ett viktigt resultat som studien har kommit fram till är kopplat till om man istället för många laddare istället har ett fåtal laddare, och låter lastbilarna köa om laddplatserna är fulla. I denna studie så begränsades antalet laddare till 2 och 3 stycken, för att se vad som skulle hända med köbildningen. Det visade sig att för alla platser så var 2 laddare alldeles för lite, det blev kötider på upp emot 50 minuter på industrierna och drygt 3 timmar på terminalen. Här måste man komma ihåg att lastbilen redan förlorar upp emot 50 minuter i snitt på att ladda, och om detta kombineras med en kötid på lika länge så riskerar lastbilen hamna efter i sitt schema och förlora pengar. När istället 3 laddare testades så blev kötiderna för de två industrierna betydligt kortare, bara några minuter. Däremot blev kötiden fortsatt lång på terminalen, ungefär en

timme, vid 3 laddare, så där krävs ännu fler laddare.

Den här studien har försökt förutspå hur elbehovet blir om så många lastbilar som möjligt har bytts till ellastbilar. Ellastbilar har andra egenskaper än de lastbilar som används idag, som gör att när det i framtiden finns många ellastbilar i drift så kommer lastbilarna köras annorlunda än vad de gör idag. Eftersom det inte finns tillräckligt med exempel på tunga ellastbilar i verkligheten, är det svårt att förutspå hur dessa kommer att köras, till exempel vilka tider de kommer till olika platser och hur långt de har kört när de kommer. Denna studie har tagit hänsyn till hur lastbilar kör idag för att analysera vilket elbehov som i framtiden kommer finnas. Det studien visar är alltså vad elbehovet blir om ellastbilar köps in, men om körmönstret för dessa lastbilar förblir densamma. Genom att visa att inte alla lastbilar kan gå på el, att elbehovet blir högt och att laddarna inte används på ett effektivt sätt, så hoppas denna studie kunna motivera vidare studier inom just hur ellastbilar ska köras på annorlunda sätt.

Exekutiv sammanfattning

Det visar sig av studien att det åtminstone går att elektrifiera drygt 60 % av inkommande transporter till terminal och industri, i vissa fall även upp emot 75 %, förutsatt att rätt dimensionerad laddinfrastruktur finns på plats. Dimensioneringen av laddinfrastrukturen bör således ske utefter det maximala predikterade antalet laddare som presenteras i rapporten, där mellan 6 och 10 laddare krävs vid laddeffekt på 375 kW, alternativt 3 till 4 om laddning med 1 MW appliceras. Att försörja transportflottan med endast 2 laddare visar sig vara för lite, då det skapar kötider på upp emot 50 minuter på industrierna och 3 timmar på terminalen. I industriernas fall räcker däremot 3 laddare för att få ner kötiden till endast några minuter, men det krävs ännu fler laddare för att få ner kötiden på terminalen.

För större förståelse rekommenderas att det vidare studeras hur flexibilitet i ruttplanering kan bidra till att minimera dimensionering av laddinfrastrukturen. Dessutom, om mer än 60 till 75 % av av transportflottan in till en industri eller terminal ska elektrifieras, krävs mer kunskap om planering och ruttoptimering för att klara av de kortare räckvidderna för batterielektriska lastbilar.

Förord

Detta examensarbete är utfört under vårterminen 2023, och markerar slutet på min tid på Civilingenjörsprogrammet i energisystem på Uppsala universitet och Sveriges Lantbruksuniversitet.

Jag vill rikta stor tacksamhet till Skogforsk för möjligheten att utföra detta examensarbete tillsammans med er. I synnerhet vill jag tacka mina handledare, Anna Pernestål och Anders Eriksson, som har varit ett stort stöd och gett mig vägledning i mitt arbete. Jag vill också passa på att tacka övriga personer på Skogforsk, Henrik von Hoffsten, Daniel Noreland, Morgan Rossander m.fl, som på olika sätt hjälpt till i arbetet. Vidare vill jag tacka alla företagsrepresentanter i projektet *Accelerera elektrifieringen av skogsbrukets transporter*, som har tillhandahållit data, bjudit in på studiebesök och bidragit till intressanta diskussioner under workshops.

Jag vill även rikta ett stort tack till min ämnesgranskare Gunnar Larsson (SLU), för ett stort engagemang och värdefull vägledning i såväl modellering som i skrivandet av rapporten. Jag vill också tacka Jesper Rydén (SLU) och Oskar Langelöv (SLU), för visat intresse och vägledning. Slutligen vill jag rikta ett stort tack till Linus Christiansen, som har varit ett värdefullt stöd och bollplank under arbetet.

Albin Werre
15 juni 2023

Ordlista

Avlägg- den plats i skogen, ofta längs med en väg, där skogsråvaran förvaras efter avverkning och hämtas av lastbil.

Terminal- (i denna rapport även inräknat omlastningsplats) en plats i skogsråvarans värdekedja som används som mellanlagring, omlastning till annat transportmedel eller i annat syfte. Avskilt från avlägg och industrilager.

Terminaltransport- i denna rapport definierat som transporter som med dedikerade fordon utförs frekvent mellan två stationära punkter, antingen mellan terminal och industri eller mellan två industrier.

Transportarbete- beskriver arbetet som en transport utför, och är multiplikationen mellan transportens flyttade massa i *ton* och hur långt den flyttats i *km*. Mäts i enheten tonkilometer [*ton * km*].

Förkortningar

SOC- eller State of Charge, anger kvarvarande laddning i ett batteri relativt dess kapacitet.

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Problembeskrivning	1
1.2	Syfte och Mål	2
1.3	Frågeställningar	2
1.4	Avgränsningar	2
2	Bakgrund	3
2.1	Skogsnäringens transportsystem	3
2.2	Vägtransportfordon inom skogsnäringen	3
2.3	Batterielektriska lastbilar inom skogsnäringen	4
2.4	Laddinfrastruktur	4
2.5	Snabbladdning av batterielektriska fordon	5
2.6	Utmaningar med elektrifiering av skogstransporter ur olika perspektiv	6
2.6.1	Transportsystemets utmaningar vid elektrifiering	6
2.6.2	Effektförserjningens utmaningar vid elektrifiering	6
2.6.3	Elnätsägarens syn på etablering av laddinfrastruktur	7
3	Metod	8
3.1	Händelsestyrd simuleringsmodell	8
3.2	Simulering av effektbehov	12
3.2.1	Effektbehovet på <i>Industri 1</i>	15
3.2.2	Effektbehovet på <i>Industri 2</i>	17
3.2.3	Effektbehovet på <i>Terminal</i>	18
3.2.4	Ingående parametrar och indata	19
4	Resultat	21
4.1	Scenario 1	21
4.2	Scenario 2	23
4.3	Scenario 3a	26
4.4	Scenario 3b	28
4.5	Scenario 4	29
5	Diskussion	32
5.1	Metoddiskussion	32
5.2	Resultatdiskussion	34
6	Slutsats	37
6.1	Att studera vidare	37

1 Inledning

Den svenska transportflottan har ett antal mål att förhålla sig till vad gäller utsläppsminskning, bland annat det övergripande målet om netto-noll utsläpp till 2045 [1] samt mål om att minska utsläppen hos de inrikes transporterna med 70 % från 2010 till 2030 [2]. Enligt Naturvårdsverket stod de Svenska inrikestransporterna för en tredjedel av Sveriges totala utsläpp av växthusgaser 2020 [3]. Vidare redovisar Trafikverket att de tunga transporterna står för ungefär 20 % av de totala utsläppen från inrikes transporter[4].

Den svenska skogsnäringens vägtransportflotta faller ofta under kategorin *tunga transporter*, och anses stå för en betydande del av det totala svenska transportarbetet[5]. Eftersom denna flotta, liksom många andra flottor av tunga transporter, fortfarande i hög grad är beroende av fossila bränslen är det aktuellt att undersöka fossilfria drivmedelsalternativ, för att kunna nå ovan nämnda mål. Enligt Andersson m.fl. [6] finns det ett antal olika fossilfria drivmedelsalternativ som övervägs när det gäller denna omställning, däribland nämns batterielektriska fordon, flytande biogas, HVO-diesel och vätgaselektriska fordon. Inom personbilssektorn har batterielektriska tekniker kommit att bli den viktigaste tekniska lösningen bland de fossilfria drivmedelsalternativen, men för tunga transporter menar IEA[7] att teknikutvecklingen hos batterier och laddinfrastruktur ännu begränsar batterielektriska lastbilar på marknaden.

I Sverige utgör skogsnäringen en viktig del av näringslivet, både genom brukandet av skogen, men framförallt genom försörjningen av råmaterial till svenska industrier. De industrier som primärt använder skogsråvaror från den svenska skogen är pappers- och massaindustrier, sågverk och biobränsleförädling av olika slag. Det finns även sekundära användningsområden av skogsråvara, där diverse biprodukter kan användas i energisyfte i exempelvis bioraffinaderier och kraftvärmeverk. För dessa industrier är försörjningen av skogsråvaran viktig och där transporten av dessa råvaror fyller en viktig funktion.

1.1 Problembeskrivning

Som visat i källa [6] finns det förutsättningar för en omfattande elektrifiering av skogsnäringens transportflotta, men det kommer också med stora utmaningar. En av dessa utmaningar kopplas till laddinfrastruktur, som är en förutsättning för att ett sådant transportsystem ska fungera. Det finns diverse studier som undersöker laddinfrastrukturen, dess roll och dess påverkan på elnätet [8][9][10][11][12][13][14][15][16][17], samt en del studier som tar upp lönsamheten hos batterielektriska transporter[6][18]. För att ge förutsättningar åt skogsnäringen för att utföra denna typ av omfattande elektrifiering krävs fler branschspecifika studier som visar på fördelarna och begränsningarna med en ökad batterielektrisk transportflotta. Då det finns många olika aktörer, varav många som endast sysslar med transportuppdrag och med strömlinjeformade affärsmodeller, krävs omfattande underlag för såväl de tekniska som de ekonomiska förutsättningarna för att möjliggöra en omställning till batterielektriska fordon.

En fundamental fråga som lyfts vid all typ av elektrifiering, är frågan om energi- och effektförsörjningen. Om transportsektorn ställer om till eldrift, kommer elnätet kunna försörja dessa transportfordon med energi och effekt? Här är inte bara mängden viktig, utan också vid vilka tider behovet är stort respektive litet. För att möjliggöra en omställning av transportsektorn måste transporternas energi och effektbehov samverka med det elnät som ska försörja dem, för att klara effektförsörjningen varje gång en transportbil ska laddas. Det är därför av intresse att undersöka och försöka förstå hur transportsystemets effektbehov kommer att se ut i framtiden, och vid vilka tidpunkter som behovet är som störst.

1.2 Syfte och Mål

Denna studie kommer att utreda det effektbehov som på industrier och terminaler tillkommer då så mycket som möjligt av de inkommande transporterna elektrifieras. Syftet med studien är att simulera effektbehovet på industrier och terminaler utifrån dagens transportmönster samt svara på hur laddinfrastruktur kan dimensioneras för att tillgodose effektbehovet. Studien syftar också till att kunna svara på när på dygnet effektbehovet kan förväntas vara som högst, och således ligga till grund för vidare analys av nätanslutning av denna typ av laddinfrastruktur. Målet med studien är att koppla ihop det transportsystem som ska elektrifieras med det elkraftsystem som krävs för detta, och således utreda förutsättningarna i detta samspel. Målsättningen i stort är att belysa de förutsättningar som kan komma att bli viktiga i framtida studier i ämnet, och således i slutändan även implementering av laddinfrastruktur för elektrifierade skogstransporter.

Studien som presenteras i denna rapport är gjort i samarbete med Skogforsk, och kan ses som ett bidrag till ett större samverkansprojekt som avser att accelerera skogsbrukets vägtransporter[19]. Detta arbete har därför avsikten att bidra till detta projekt med en första inblick i det framtida systemet som avses uppnås, och belysa några av de utmaningar som kan bli viktiga att ta hänsyn till i en framtida implementering av laddinfrastruktur till en elektrifierad skogstransportflotta.

1.3 Frågeställningar

För att studien ska uppfylla sitt syfte så har ett antal frågeställningar tagits fram, som studien ämnar svara på.

- Hur ser effektbehovet från snabbbladdning ut på de utsedda platserna?
- När på dygnet är effektbehovet som störst, respektive minst?
- Hur bör laddinfrastrukturen dimensioneras?
- Hur stor del av den studerade transportflottan är idag tekniskt möjligt att elektrifiera, givet rådande transportmönster?

1.4 Avgränsningar

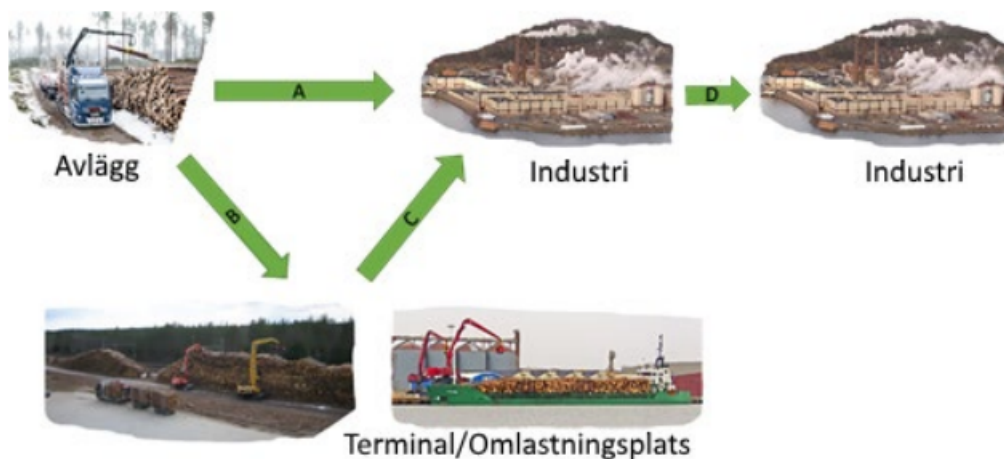
Studien avser utreda det effektbehov som en framtida flotta av elektrifierade vägtransportbilar kan ge upphov till vid en viss verksamhet i skogsnäringens transportkedja. Eftersom denna transportkedja är komplex så kommer vissa förenklingar såväl som generaliseringar att appliceras. Detta görs framförallt för att den modell som kommer att tas fram i samband med studien inte tillför onödig komplexitet till det som ska studeras. Det som studeras i modellen är ett framtida system med en antagen storskaligt elektrifierad transportflotta, men som bygger på dagens transportmönster givet en fossilberoende sådan. Det är rimligt att tänka att det med nya tekniker även tillkommer nya förutsättningar och således nya förhållningssätt till olika parametrar, som helt och hållet förändrar det studerade systemet. Detta kommer inte att tas hänsyn till i modellens uppbyggnad, eftersom modellen syftar till att ge en bild av systemet givet dagens transportmönster.

Vidare, vad gäller möjlighet till laddning, så kommer denna studie att ta hänsyn till två kategorier av laddinfrastruktur, det vill säga semi-publik laddning på den studerade platsen och depåladdning. Det kommer antas att samtliga lastbilar har möjlighet att ladda på sina depåer, exempelvis under natten. Det kommer också att antas att snabbbladdningen som sker på den valda platsen är det enda bidraget lastbilen kan få under ett arbetat skift, således utesluts publik laddning på exempelvis lunchraster och dylikt.

2 Bakgrund

2.1 Skogsnäringens transportsystem

Skogsnäringens transportsystem är ett omfattande nät av transporter vars uppgift är att flytta stora mängder biomassa från uttaget i skogen till platser där biomassan används eller förädlas. Dessa platser är vanligtvis industrier som sågverk och pappers- och massabruk, men innefattar även andra användare av biobränslen. Transportmedlen som används i detta transportsystem är olika beroende på vilken sträcka biomassan ska transporteras, men där lastbil och tåg dominerar vid landburna transporter. I arbetsrapporten *Skogsbrukets vägtransporter 2020* [5], utförd av Skogforsk, identifieras ett antal huvudsakliga flöden som de vanligast förekommande flödena inom skogsnäringens vägtransporter, se figur 1. De huvudflöden som visas i denna rapport startar i skogen, på ett avlägg, och där den första transporten antingen går direkt till en industri eller till en terminal för omlastning eller lagring, i figur 1 framställt som flöde A respektive B. [5] menar att transportflödena A och B endast är möjligt att utföra med lastbil, och således börjar alla transportflöden med en lastbilstransport. Vidare är det vanligt att sträcka C, mellan terminal och industri, utförs med hjälp av tåg, men lastbilar utgör allt jämt en stor del av även detta flöde. Till sist visar flöde D transporter av biomassa mellan industrier, som utgörs av diverse biprodukter från industrierna. Ett exempel på detta är sågspån och flis från sågverk som bland annat kan användas i pappers- och massabruk.



Figur 1: De vanligast förekommande vägtransportflödena av biomassa inom skogsnäringens transportsystem. Startpunkten anses här vara avlägg, och slutpunkt industrier, och de gröna pilarna visar transporter med lastbil[5].

I denna studie kommer denna förenklade modell av det komplexa transportsystemet att användas som utgångspunkt för antaganden och reflektioner. Det kommer således förekomma generaliseringar i det sätt som transportsystemet framställs och används i den presenterade simuleringsmodellen. Det bör därför nämnas att detta är en generalisering och behöver inte representera enskilda fall i det verkliga systemet.

2.2 Vägtransportfordon inom skogsnäringen

De transportfordon som används för vägtransporter inom skogsnäringen är allt som oftast någon typ av lastbil som är anpassat efter den skogsråvara som ska befaktas. De vanligaste typerna är timmerfordon för rundvirkestransport och flisfordon för mera finfördelade skogsråvaror såsom flis och spån. Däremot finns det många olika varianter av dessa med avseende på vikt. Den tyngsta bruttovikten som får framföras på svenska vägar är 74 ton, men detta är endast i

dagsläget tillåtet på ett begränsat antal vägar (ungefär 10 % av det svenska vägnätet). Däremot är det vanligt att bruttovikten uppgår till 64 ton för skogsnäringsens vägtransporter, då denna vikt är godkänd för en större del av vägnätet. För rundvirkestransporter är det vanligaste transportfordonet ett timmerfordon med en bruttovikt på 64 ton, och det kan således frakta mellan 41 och 48 ton skogsråvara, beroende på om lastbilen är utrustad med egen kran eller ej. Vidare kan ett flisfordon i regel anses väga 2 till 3 ton mer än ett timmerfordon, vilket gör att den kan lasta något mindre skogsråvara än motsvarande timmerbil[20].

2.3 Batterielektriska lastbilar inom skogsnäringsen

Det finns en del exempel på projekt som ämnar möjliggöra elektrifieringen av tunga transporter. Ett exempel på ett sådant projekt är det nationellt omspannande projektet REEL som syftar till att accelerera omställningen till batterielektriska lastbilstransporter inom flera olika typer av verksamheter som ägnar sig åt regionala transporter[21]. Bland dessa verksamheter ingår aktörer från skogsnäringsen, genom ett underprojekt som utförs av SCA, Skogforsk och Scania. I detta projekt har sedan 2022 SCA testat driften av en världsunik eltimmerbil, som har transporterat skogsprodukter både på en typisk terminalsträcka och från avlägg[22]. Denna eltimmerbil är levererad av Scania och har specifikationer enligt källa [23]. Batteriets kapacitet är bland annat redovisat som 624 kWh installerad kapacitet, men där den tillgängliga kapaciteten är 468 kWh. Vidare redovisas även att batteriet har en maximal laddkapacitet på 375 kW från ett CCS2-uttag (Combined Charging System, se sektion 2.4).

2.4 Laddinfrastruktur

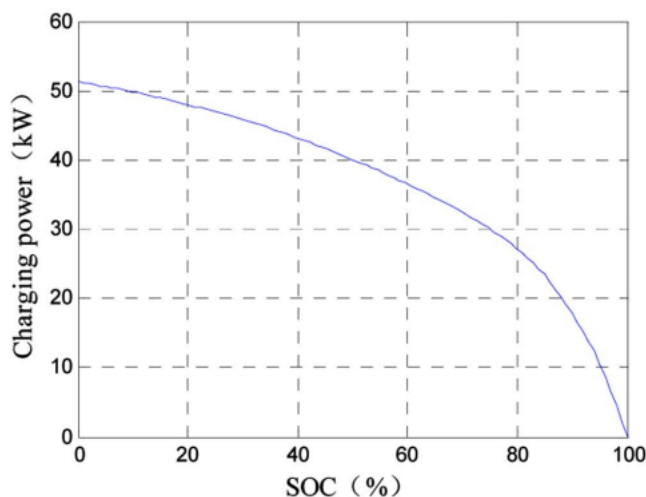
För att ladda ett batterielektriskt fordon finns en rad olika tekniker som delvis skiljer sig åt, både vad gäller storleken på effektuttaget såväl som hur den fundamentala tekniken fungerar. Det som i Sverige dominerar idag för laddning av samtliga vägopererade batterielektriska fordon anses vara statisk laddning[24], vilket avser fasta laddpunkter med laddning via sladd. Vad gäller statisk laddning, kan dessa delas upp i olika former av laddning. En kategorisering av statisk laddning är depåladdning, semi-publik laddning och publik laddning[25], där namnet antyder var laddpunkten befinner sig. Depåladdning sker på flottans egen depå, semi-publik laddning kan exempelvis ske på av- eller omlastningsplatsens (exempelvis de industrier och terminaler som studeras i denna rapport) och publik laddning avser laddning vid laddpunkter som är öppna för allmänheten. Enligt Power Circle[26] anses depåladdning räcka för många typer av godstransporter, där sträckorna är relativt korta, men ju längre transporter som elektrifieras kommer semi-publika och publika laddstationer spela en större roll.

Vidare kan statisk laddinfrastruktur kategoriseras med avseende på vilken teknik som används, och således vilken effekt den kan ge. För laddning med lägre effekter, upp till ungefär 50 kW, är det möjligt att använda sig av växelström[27][26]. Den europeiska standarden för laddning med växelström är med ett Typ 2-uttag[26]. Eftersom Typ 2-laddning endast uppgår till 50 kW är depåladdning möjligen den enda applikationen som denna laddning skulle kunna vara lämplig till. Detta eftersom laddhastigheten inte kan konkurrera med de tekniker som finns tillgängliga via likström, och eftersom laddningen inte är lika tidsbegränsad under depåladdning. För laddning med likström finns ytterligare en europeisk standard som kallas CCS (Combined Charging Systems), som kombinerar ett Typ 2-uttag med ett likströmsuttag[26]. Denna teknik kan således komma upp i högre effekter och därmed kortare laddtider. Hur stor effekt ett CCS-uttag kan ge verkar variera. Enligt ICCT[27] kan en effekt på 350 kW uppnås, medans Power Circle[26] menar att ett CCS-uttag kan ge en effekt på upp till 400 kW. Konsensus råder dock mellan dessa källor kring att det finns nya tekniker under utveckling vad gäller laddinfrastruktur

med högre effektleverans. Ett exempel är utvecklingen av MCS(Megawatt Charging System), som anses kunna ge effekter i Megawatt-skala. Power Circle förutspår att snabbladdning med 1 MW är tekniskt möjligt till år 2030[26], samtidigt som ICCT nämner ett pilotprojekt(utfört av CharIN) som planerar kommersialisering av MCS på upp till 3,75 MW till 2024[27].

2.5 Snabbladdning av batterielektriska fordon

När ett batterielektriskt fordon ska laddas finns det en del saker som styr hur det går till. Som nämnt i sektion 2.4 ovan, finns det olika tekniker för laddinfrastrukturen som ger olika mycket effekt och således laddar ett fordon på olika tid. Själva laddningen av ett fordon batteri styrs av dess BMS (Battery Management System), som säkerställer att laddningen sker på ett optimalt sätt för att öka säkerheten och förlänga batteriets livstid[28]. Enligt Cao et.al.[15] kan laddningen av ett batterielektriskt fordon inte förväntas ske med konstant effekt, eftersom BMS delvis kommer begränsa strömmen och spänningen som förses av laddaren. Det finns två huvudsakliga strategier vid laddning av ett batteri, CV(constant voltage, på svenska; konstant spänning) och CC(constant current, på svenska; konstant ström). CV-strategin anses relativt långsam, men säkerställer den bästa livslängden på batteriet. CC-strategin däremot, kan appliceras på snabbladdning då denna strategi ger snabb laddtid. Däremot är denna skadlig för batteriets livslängd[17]. Ett BMS-system kan med fördel applicera en kombination av dessa två strategier för att optimera både snabb laddtid och minimal påverkan på batteriets livslängd. Således följer effekten ett visst mönster under laddningen, där laddning sker med hög effekt i början och allt eftersom SOC(State of Charge) ökar så minskar BMS effekten med vilken laddningen sker, och således saktas laddhastigheten in. Detta mönster exemplifieras i figur 2 av Cao et. al.[15], där det går att utläsa en tydlig nedgång av laddeffekten vid 80 % SOC. Enligt Finnerty[29] förväntas effekten i allmänhet minska drastiskt när SOC når 80 % vid laddning av ett bilbatteri, och således råder konsensus kring att en snabbladdning är färdig då batteriet når 80 %.



Figur 2: Ett exempel på hur en effektkurva kan se ut för en personbil. Kurvan visar hur effekten ändras då SOC ökar vid laddning. Källa Cao et. al.[15].

Vidare menar Cao et. al. [15] att bland de tre olika faktorerna som kan begränsa laddningen, där dessa avser 1) batteriets maximala laddeffekt (bestämt av BMS som beskrivet ovan), 2) användarens inställda maxeffekt (om laddinfrastrukturen erbjuder ett val) och 3) laddinfrastrukturens laddkapacitet, är det alltid den lägsta av dessa som styr vilken laddeffekt som

batteriet tar emot.

2.6 Utmaningar med elektrifiering av skogstransporter ur olika perspektiv

Nedan följer en nulägesbeskrivning över utmaningarna med omställningen till elektrifierade skogstransporter, utifrån några olika perspektiv. Här redovisas transportörernas perspektiv, och vad de anser är de viktigaste utmaningarna och begränsningarna vid storskalig elektrifiering. Vidare beskrivs även utmaningar kopplat till elnätet som kan komma att bli viktiga, såväl som elnätsägarens perspektiv.

2.6.1 Transportsystemets utmaningar vid elektrifiering

Följande sektion baseras på insikter från en workshop som hölls av Skogforsk 2023-03-15, som en del av projektet *Accelerera elektrifiering av skogsbrukets transporter*[19]. Medverkande på denna workshop var ett femtontal personer från såväl skogsföretag, åkeriföretag, lastbilstillverkare som samverkansplattformar inom transporter samt representanter från Skogforsk.

Omställningen och viljan att elektrifiera transporterna inom skogsnäringen drivs av ett antal faktorer, däribland viljan att minska sina klimatavtryck, såväl som att bli mer självförsörjande på energi och stärka sin konkurrenskraft i en grön framtid. Det finns däremot även ett antal utmaningar och osäkerheter kring denna omställning, som tas upp av de verksamheter som köper och säljer transporterna i fråga. En stor fråga som kommer upp är kopplat till laddinfrastrukturen, där många osäkerheter finns. Dels handlar det om att implementera laddinfrastrukturen på ett effektivt sätt så att denna kan försörja hela transportkedjan, inte bara nära stora städer och vägar. Dels måste dessa försörjas med elektrisk effekt när det efterfrågas. Vidare finns det stora osäkerheter kring hur lång tid en laddning sker, och hur denna tid ska integreras i lastbilens fullspäckade körschema. I dagsläget har chauffören en obligatorisk vilotid på 45 minuter under varje skift, och teoretiskt sett skulle denna tid kunna utnyttjas till laddning, med förutsättningen att det finns en ledig laddare vid samma tid och plats som denna rastperiod utnyttjas.

En annan stor osäkerhet kring elektrifieringen av skogstransporter, och som lyfts ofta av de aktörer som utför och köper transporter, är den ekonomiska aspekten. En ellastbil är idag dyrare än en konventionell lastbil, och kombinerat med fluktuerande elpriser är det svårt att veta om det finns en ekonomisk vinning i att investera i en ellastbil. Dessutom har ellastbilar andra egenskaper än vad konventionella lastbilar har, exempelvis kortare räckvidd och krav på längre stopp vid laddning. Dessa faktorer kan komma att påverka transporternas effektivitet, vilket således också påverkar den ekonomiska kalkylen negativt.

2.6.2 Effektförsörjningens utmaningar vid elektrifiering

Det som riskerar att hända när tillväxten i elektrifieringen går snabbare än tillväxten i det system som ska förse dessa med energi, är att det riskerar att tillkomma problem i försörjnings-säkerheten, i form av kapacitetsbrist och effektbrist. Kapacitetsbrist i elnätet beror ofta på att det finns en begränsning i hur mycket effekt som kan överföras från producent till användare, alternativt från ett elområde till ett annat. Effektbristen är däremot en händelse som uppstår när efterfrågan på effekt inte kan levereras av någon anledning, antingen på grund av kapacitetsbrist eller underproduktion[30]. Riskerna med en bred utbyggnad av laddinfrastruktur för att förse en storskaligt elektrifierad vägtransportflotta, är att de effekttoppar som tillkommer vid snabbaddning av dessa sammanfaller med andra sektorer efterfrågan, och således skapar eller

förstärker tidigare nämnda problem.

Det är inte bara tillgången på effekt som riskerar att påverkas av en bred elektrifiering av vägtransportflottan, utan även andra problem kan uppstå i samband med höga effektuttag. Enligt Tran et. al. [14] riskerar en omfattande ökning av batterielektriska fordon överlag leda till lokala och regionala effekter på nätet, tack vare dess ökande behov av laddning. Bland dessa nämns överhettning av överbelastade transformatorer, samt faktorer som påverkar effektkvaliteten, såsom spänningsfluktuationer och harmonisk distortion. Harmonisk distortion är något som kan uppstå vid användandet av icke-linjära komponenter för att kontrollera effektoverföringen, bland annat likriktare[17]. Det kan förklaras som avvikelser i växelströmmen och växelspanningens sinus-våg. Detta påverkar dock inte frekvensen hos grundtonen[31][32]. Spänningsfluktuationer däremot, är ett exempel på andra typer av avvikelser som kan uppkomma vid snabba förändringar i elnätet och som påverkar spänningens rms-värde, som bland annat resulterar i att lampor flimrar och som kan vara skadligt för känslig elektronik[32].

Enligt Hjeltström¹ kan effektkvaliteten påverkas i synnerhet långt ut i nätet, det vill säga vid punkter med färre anslutningar och där nätet inte är lika starkt som på andra ställen. Vidare menar Hjeltström att allt mer elproduktion (bland annat i form av privata solcellsanläggningar) och stora laster (exempelvis laddinfrastruktur) på dessa platser kan bidra till lokala effekter på effektkvaliteten.

2.6.3 Elnätsägarens syn på etablering av laddinfrastruktur

Följande sektion baseras på en intervju som hölls 2023-05-10 med Henrik Hjeltström, EON Elnät.

När en aktör vill ansluta sig till elnätet för etablering av exempelvis laddinfrastruktur, så sker först en så kallad föransökan. Denna läggs i en kö för nätanslutning. Tiden det tar från att en föransökan görs av aktören, tills det att anslutningen sker, beror delvis på hur lång kön av föransökningar är, men också hur stor en eventuell ombyggnation de måste genomföra för att kunna genomföra anslutningen. Elnätsägaren har det som kallas för anslutningsskyldighet, vilket innebär att de inom skäligena villkor har skyldighet att ansluta alla typer av elektriska anläggningar till sitt nät, och om ett undantag till denna regel ska göras så prövas ärendet av Energimarknadsinspektionen[33]. Detta innebär att om det fattas kapacitet vid en anslutning, har elnätsägaren skyldighet att vidta åtgärder för att kapaciteten ska vara tillgänglig.

Hjeltström menar att det oftast är tid och pengar som begränsar anslutningen av nya anläggningar. Han menar att för att göra anslutningsprocessen så smidig som möjligt, så är det viktigt att ta kontakt med elnätsägaren i ett tidigt stadium, redan innan en föransökan görs. Detta gör det enklare för elnätsägaren att ha en överblick över de anslutningar som ska göras, och således kan de korta ner ledtiderna.

Ett problem som Hjeltström ser med just laddinfrastruktur är att dessa tenderar att boka upp höga effekter på elnätet, men som sedan inte utnyttjas fullt ut. Laddinfrastrukturen bokar alltså upp effekt på nätet för att kunna ladda fordon med en viss effekt, men denna uppnås endast ett fåtal gånger, men lämnas outnyttjad större delen av tiden. Detta gör att elnätsägaren i vissa fall behöver bygga ut elnätet för att klara nya anslutningar, som i själva verket hade kunnat utnyttja den outnyttjade uppbokade effekten. Detta ser Hjeltström som en utmaning för elnätsägaren, att på ett bättre sätt förstå sina kunders laster och att använda effekten mer effektivt.

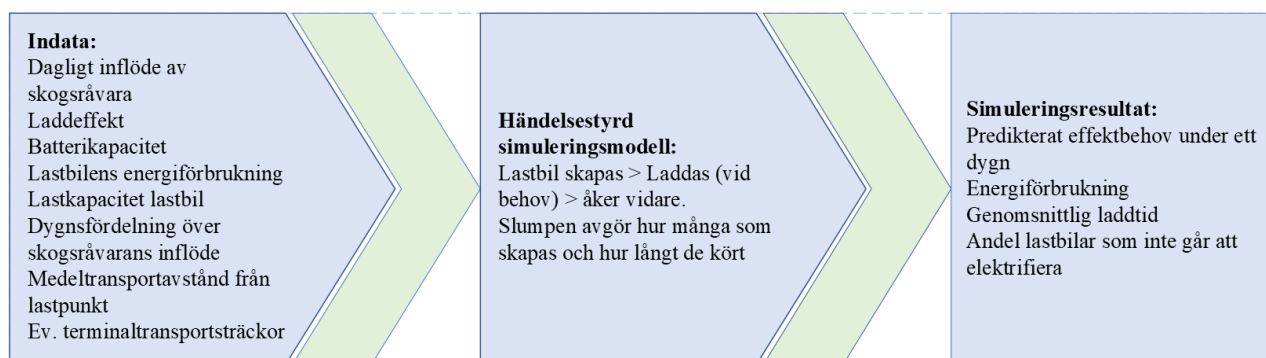
¹Henrik Hjeltström, EON elnät, 2023-05-10, intervju

3 Metod

Nedan beskrivs de metoder som använts för att nå resultaten i denna studie. I sektion 3.1 presenteras den händelsestyrda modellen som kommer att appliceras på de olika fallen för att beräkna såväl effektbehov som övriga resultat. Vidare kommer i sektion 3.2 en beskrivning av de *scenarier* som kommer att antas, samt vilka olika *fall* dessa kommer att appliceras på.

3.1 Händelsestyrd simuleringsmodell

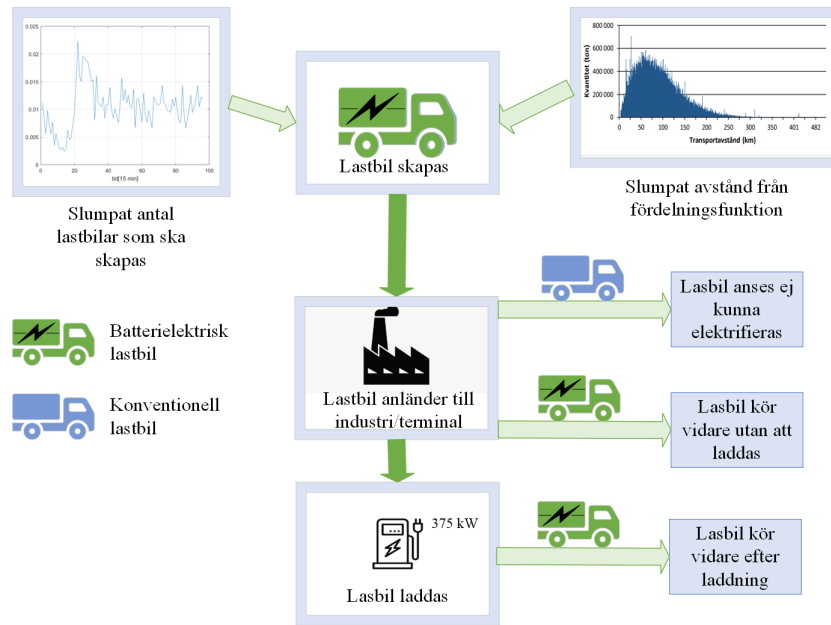
Studien som presenteras i denna rapport utgår från vissa platser, se sektionerna 3.2.1, 3.2.2 och 3.2.3, där laddinfrastruktur för snabbbladdning kan etableras. På dessa platser appliceras en simuleringsmodell för att prediktera ett effektbehov hos laddinfrastrukturen från de transporter som beräknas anlända till platsen. Simuleringsmodellen är gjord i MATLAB:s simuleringsverktyg SIMULINK, och kompletteras av stödjande MATLAB-script, bland annat i datahanterings-syfte. Modellen är byggd som en delvis händelsestyrd simuleringsmodell som använder sig av SimEvents-paketet i SIMULINK.



Figur 3: Översiktlig beskrivning av simuleringsmodellen, inklusive in- och utdata.

I figur 3 visas den översiktliga idén med simuleringsmodellen, och framförallt vilken indata som behövs och vilka resultat som ges av den. För att modellen ska kunna prediktera när på dygnet lastbilar förväntas anlända, använder den sig av data över hur det förväntade inflödet av skogsråvara fördelas över dygnet. Detta kompletteras även av det totala inflödet av skogsråvara. Vidare, för att veta hur långt lastbilen kört när den anländer till platsen används data över medelavståndet för lastbilar, från det att de lastas till att de anländer till platsen. Utöver detta används även diverse egenskaper hos en batterielektrisk lastbil, inklusive batterikapacitet och förbrukning.

Den händelsestyrda simuleringsmodellens uppbyggnad visas i figur 4 och bygger till stor del på att lastbilar anländer till platsen, laddas om det behövs och sedan åker vidare. I modellen anges tiden för anländandet av lastbilen, som den tiden då lastbilen skapas. Då fokuset ligger på hur dessa lastbilar påverkar effektbehovet på den avsedda platsen, använder simuleringsmodellen lastbilens transportmönster innan den kommer till den givna platsen som indata, men försummar det som händer efter att lastbilen lämnat platsen. Det vill säga det som bestämmer om lastbilen behöver laddas eller ej är endast baserat på den sträckan som den kört till platsen, och inte vilken sträcka den väljer att köra efter.



Figur 4: Förenklad beskrivning av hur simuleringsmodellen är uppbyggd. Lastbilar skapas och får egenskaper baserat på data och slumpfaktorer. Lastbilarna anländer sedan till platsen i fråga och har sedan tre olika vägar att gå baserat på dess egenskaper. Om lastbilen har åkt för långt anses den inte kunna elektrifieras, och anses då vara en konventionell lastbil. Vidare kan de batterielektriska lastbilarna laddas eller inte laddas, beroende på hur långt de åkt och vilken SOC de beräknas ha.

Det som bestämmer hur många lastbilar som skapas varje tidssteg är en poissonfördelad slumpfaktor, som appliceras på data om hur många lastbilar som förväntas kunna komma till det specifika stället inom ett tidsintervall. Det stokastiska inslaget ger modellen möjlighet att förutse variationer i transportmönstret som bättre representerar verkligheten, än vad ett medelvärde gör. Det förväntade antalet lastbilar som ska skapas, bestäms av indata, som består av det totala inflödet av skogsråvara till den studerade platsen (V_{in}), hur stor volym i genomsnitt som får plats på en lastbil (V_{last}) samt data över hur den totala volymen fördelas varje tidssteg för den angivna simulerings tiden (x_i , där i står för ett tidssteg). I varje tidssteg sker således en beräkning av antalet lastbilar som i medeltal förväntas skapas, se ekvation 1.

$$n_i = \frac{V_{in} * x_i}{V_{last}} \quad (1)$$

där n_i är antalet förväntade lastbilar varje timme, i .

Det förväntade antalet lastbilar, n_i , används sedan som parameter i en poissonfördelad oberoende slumpgenerator. Slumpgeneratorn slumpar således fram ett tal, som symboliserar hur många lastbilar som faktiskt kommer att skapas i det givna tidssteget, i , enligt ekvation 2.

$$n_{i,slump} \in Po(n_i) \quad (2)$$

där $n_{i,slump}$ är det slumpade antalet bilar, och n_i är det förväntade antalet lastbilar och tillika poissonparametern i varje enskilt tidssteg.

Poissonfördelningen är en diskret fördelningsfunktion [34] och returnerar således ett värde på $n_{i,slump}$ i form av ett heltal. Valet av Poisson-fördelning i den stokastiska beräkningen av inkommande lastbilar, motiveras delvis med att den är diskret, men också att den endast antar värden större än noll. Detta är en fördel i denna modell eftersom det som minst kan ankomma noll lastbilar till platsen.

Vidare används det slumpade värdet $n_{i,slump}$ som inparameter i den händelsestyrda simuleringsmodellen. Slumptalet bestämmer således hur många *lastbilar* som ska anlända till den givna platsen. Skapandet av lastbilarna innebär också att varje lastbil tilldelas en rad egenskaper, som är relevant för hur den beter sig i systemet. Det som anges är bland annat egenskaper för laddning och batteristorlek, transportavstånd, SOC och transportuppdrag.

För att de skapade lastbilarna i detta steg ska få egenskaperna transportavstånd, SOC och transportuppdrag, används data från de inkommande lastbilarna på den studerade platsen, och deras transportavstånd. För att prediktera transportavståndet på den skapade lastbilen, används en fördelningsfunktion som tas fram. Den fördelningsfunktion är i detta fall en Rayleigh-fördelning, vilket går att motivera med det visuella intrycket. Här testades olika fördelningsfunktioner för att på bästa sätt avbilda data från de inkommande transporternas körda sträcka, och där Rayleigh valdes som ned fördelningsfunktion som avbildade verkligheten bäst. Fördelningsfunktionen används för att ta fram ett slumpat avstånd enligt ekvation 3.

$$d_{l,slump} \in Rayleigh(\sigma_r) \quad (3)$$

där $d_{l,slump}$ är det slumpade transportavståndet i *km* för en specifik lastbil och σ_r är Rayleigh-parametern, och $Rayleigh(\sigma_r)$ betecknar den fördelningsfunktion som tagits fram för att avbilda data över de inkommande transporternas körda sträcka.

Det slumpade transportavståndet ligger således till grund för lastbilens SOC. Vidare kan SOC antas vara resultatet av den sträcka som lastbilen kört lastad, $d_{l,slump}$, tillsammans med den sträcka som lastbilen kört olastad från senaste laddpunkten till punkten där den lastats, $d_{l,olastad}$. Sambandet mellan lastbilens körda sträcka som lastad respektive olastad kallas lastkörningsgrad, och antas vara 55 % lastad och 45 % olastad[5]. Det är alltså endast den lastade sträckan som slumpas och den totala sträckan bestäms av den lastade sträckan, enligt tidigare nämnda lastkörningsgrad. Detta antagande grundas i att om lastbilen kört en sträcka lastad innan den kommer till platsen, så måste den också ha kört en sträcka olastad för att komma till platsen där den lastades. Den totala sträckan som lastbilen antas ha kört när den kommer till platsen, d_l , kan då beräknas enligt ekvation 4.

$$d_l = d_{l,slump} + d_{l,olastad} = d_{l,slump} + \frac{0,45}{0,55} * d_{l,slump} \quad (4)$$

Med detta antagande följer även antaganden om vilken förbrukning som lastbilen har i lastat respektive olastat tillstånd, se tabell 1. Således kan SOC bestämmas med hjälp av d_i enligt ekvation 5.

$$SOC_l = 1 - \frac{d_{l,slump} * E_{forb,lastad} + d_{l,olastad} * E_{forb,olastad}}{E_{kapacitet,batteri}} \quad (5)$$

där SOC_l är lastbilens SOC, $E_{forb,lastad}$ och $E_{forb,olastad}$ är medelförbrukningen hos lastbilen under det givna tillståndet i *kWh/km* och $E_{kapacitet,batteri}$ är den tillgängliga batterikapaciteten i *kWh*.

I modellen anses en del lastbilar vara tekniskt begränsade från att elektrifieras. Detta bestäms med hjälp av ekvation 4, och den beräknade räckvidden hos en batterielektrisk lastbil, som beräknas enligt ekvation 6 nedan. Om den körda sträckan är längre än räckvidden, det vill säga om ekvation 7 uppfylls, så anses transporten vara för lång för att uppfyllas av den batterielektriska lastbilen. Under antagandet att det krävs fler laddpunkter än vad som antas i studien för att kunna elektrifiera dessa transporter, se sektion 1.4, visas således denna elektrifieringsgrad som ett resultat av vad som är möjligt i detta fall..

$$d_{rackvidd} = \frac{E_{kapacitet,batteri}}{0,55 * E_{forb,lastad} + 0,45 * E_{forb,olastad}} \quad (6)$$

$$d_l > d_{rackvidd} \quad (7)$$

Vidare kan transportuppdraget bestämmas utifrån transportavståndet, med antagandet att det finns två huvudsakliga uppdrag. Det första uppdraget antas vara transporter från avlägg, med en stor variation i transportavstånd, och det andra antas vara frekventa transporter från ett eller ett antal olika avstånd, oftast kopplat till terminaltransporter eller frekventa transporter mellan industrier (se flöde C och D i figur 1). Lastbilen beter sig således olika i systemet beroende på vilket uppdrag den antas ha. Om lastbilen antas komma från avlägg, härmed kallat *transportuppdrag 1*, så sker laddning under villkoret att $SOC_l \leq X_1$, där X_1 är ett angivet värde på när en lastbil anses behöver snabbbladdas på platsen. I modellen antas *transportuppdrag 1* innebära att lastbilen endast har hämtat från avlägget och kört lasten till den avsedda platsen, och därefter kör vidare på ett nytt uppdrag som inte tas i beaktning i denna studie. Däremot, vad gäller de transportuppdrag som innebär att en och samma lastbil har uppdraget att köra fram och tillbaka mellan två platser, härmed kallat *transportuppdrag 2*, så antas dessa ha ett annat krav på sig för att snabbbladdning ska behövas. Således kan villkoret för *transportuppdrag 2* uttryckas på liknande sätt som för *transportuppdrag 1*, det vill säga att $SOC_l \leq X_2$ där X_2 är det angivna kriteriet för snabbbladdning av lastbilar med *transportuppdrag 2*. Avslutningsvis hanteras lastbilar med *transportuppdrag 2* som har laddats på samma sätt som de lastbilar med *transportuppdrag 1*, det vill säga de åker vidare mot andra uppdrag och är inte längre relevanta för studien.

Snabbbladdningen av en lastbil sker således givet ovan beskrivna villkor. När laddning sker görs det upp till en SOC på 80 %, se sektion 2.5. Laddningen av batteriet antar i modellen en konstant effekt, och approximeras utifrån figur 2 till att anta ett värde som motsvarar 80 % av den maximala laddkapaciteten. Det vill säga, den effekten som laddaren antas ge batteriet, $P_{laddare}$, anges enligt ekvation 8.

$$P_{laddare} = 0,8 * P_{maxladdkapacitet} \quad (8)$$

Den beräknade laddtiden kan således beräknas genom ekvation 9.

$$t = \frac{(0,80 - SOC_l)}{C} \quad (9)$$

där t är tiden för snabbbladdning och C är lastbilsbatteriets C-värde, som indikerar hur snabbt batteriet kan laddas upp och definieras som effekten som batteriet kan laddas med dividerat med batteriets energikapacitet[35], se ekvation 10.

$$C = \frac{P_{laddare}}{E_{kapacitet,batteri}} \quad (10)$$

Det effektbehov som beräknas i varje tidssteg blir således det antal lastbilar som finns vid laddpunkten samtidigt, multiplicerat med den effekt som ges av laddinfrastrukturen. Tilläggningsvis tillkommer en del energiförluster i laddinfrastrukturens topologi. Enligt Tu et. al.[13] kan en laddstation för snabbbladdning av batterielektriska fordon ha en verkningsgrad på mellan 91 och 95 %, och i denna studie antas verkningsgraden vara 95 %. Således räknas effektbehovet i varje tidssteg, P_i , ut med hjälp av ekvation 11.

$$P_i = n_{i,laddas} * \frac{P_{laddare}}{0,95} \quad (11)$$

där $n_{i,laddas}$ är antalet lastbilar som samtidigt laddas i varje tidssteg.

Det som simuleringsmodellen ger som resultat redovisas i figur 3. Dels ger simuleringen en bild över det effektbehov som modellen predikterar för den givna platsen under ett dygn, med en

tidsupplösning på 15 minuter. Ett av resultaten som modellen ger är energiförbrukningen under dygnet, vilket beräknas som tidsintegralen av det predikterade effektbehovet. Utöver dessa resultat, som anses viktiga ur elsystemets perspektiv, redovisas andra resultat som är intressanta ur transportsystemets perspektiv. Det som enligt figur 3 redovisas är således den genomsnittliga laddtiden och andelen av alla transporter som, givet antaganden, inte går att elektrifiera ty dess körsträcka är längre än lastbilens räckvidd. Det senast nämnda redovisas både i procent av antalet lastbilar samt i procent av det transportarbete (arbetet som en transport utför, definierat som den flyttade massan i ton, multiplicerat med sträckan i km) som dessa lastbilar utgör.

3.2 Simulering av effektbehov

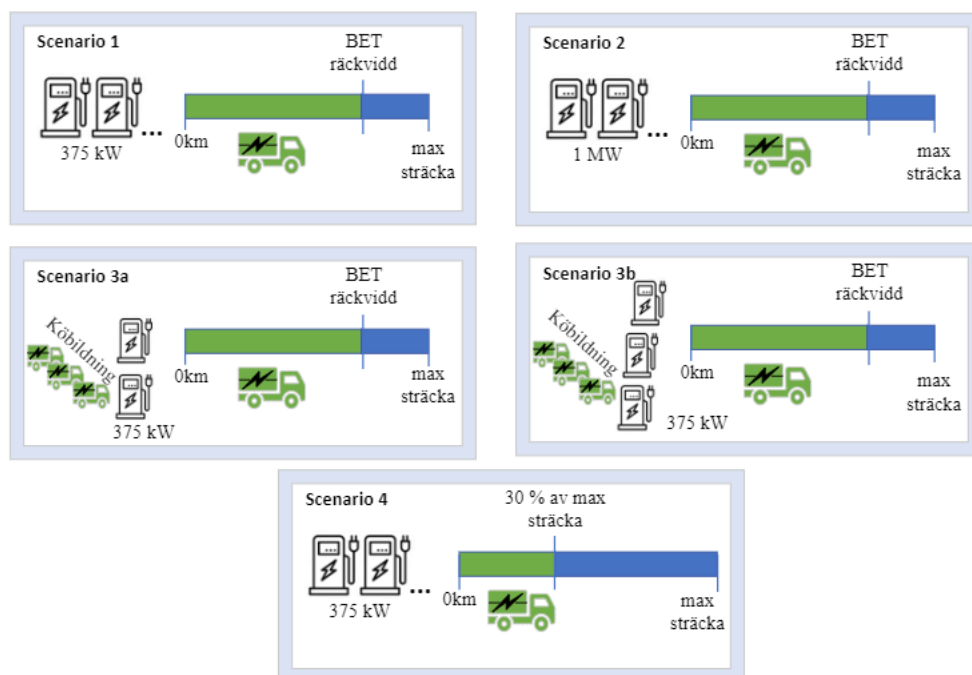
För att simulera effektbehovet hos en etablerad laddinfrastruktur på en industri eller terminal, kommer ovan beskrivna simuleringsmodell att användas. Simuleringen kommer utföras utifrån ett antal *Scenarier*, som presenteras nedan. Dessa scenarier visualiseras även i figur 5.

Scenario 1: Effektbehovet från elektrifiering av samtliga vägtransporter inom ramen för batterielektriska lastbilens räckvidd, förutsatt dagens teknik för laddinfrastruktur(375 kW). Ingen begränsning i antal laddare appliceras.

Scenario 2: Effektbehovet från elektrifiering av samtliga vägtransporter inom ramen för batterielektriska lastbilens räckvidd, förutsatt framtidens teknik för laddinfrastruktur(1 MW). Ingen begränsning i antal laddare appliceras.

Scenario 3a och 3b: Effektbehovet från elektrifiering av samtliga vägtransporter inom ramen för batterielektriska lastbilens räckvidd, förutsatt dagens teknik för laddinfrastruktur(375 kW). Antal laddare begränsas till 2(a) och 3(b).

Scenario 4: Effektbehovet från *delvis* elektrifiering, där alla transporter inom 30 % av den längsta sträckan elektrifieras. Förutsätter dagens teknik för laddinfrastruktur(375 kW). Ingen begränsning i antal laddare appliceras.



Figur 5: Översiktlig visualisering av skillnaderna i de olika scenarierna som kommer studeras i denna rapport. Den gröna stapeln visar den del av det totala avståndet som i denna studie och under studiens betingelser anses kunna elektrifieras. Övrigt (den blå stapeln) anses här behöva applicera konventionella transportbilar.

Scenario 1 antas vara det grundläggande scenariot som utgår från att så många transporter som möjligt elektrifieras, det vill säga alla som faller inom den beräknade räckvidden. Vidare kommer *Scenario 1* utgå från dagens teknik vad gäller laddinfrastruktur. Snabbladdningen i detta scenario kommer antas kunna ske med en CCS-laddare, se sektion 2.4, vilken antas kunna ladda med den effekt som batteriet kan ta emot, i detta fall 375 kW. Till sist kommer i detta scenario antas att det varken finns en begränsning i antalet laddare som kan förse de lastbilar som ska laddas, eller en begränsning i hur mycket effekt som samtidigt kan förse laddningen.

Scenario 2 antar i princip samma antaganden som *Scenario 1*. Det enda som skiljer detta scenario åt är att det antar en mer framtida lösning för laddinfrastruktur. Istället för att anta CCS-teknik för snabbladdning, som i *Scenario 1*, antar *Scenario 2* att MCS-teknik kan appliceras, och således att lastbilarna kan ladda med 1 MW.

Scenario 3 utgår även detta från *Scenario 1*, där snabbladdning sker med CCS-teknik med en effekt på 375 kW. Vidare antas att alla transporter vars körsträcka faller inom räckvidden för batterielektriska lastbilar elektrifieras. I *Scenario 3* kommer däremot antalet laddpunkter att begränsas i simuleringen, och således kommer även den effekt som ska tillgodoses att begränsas. När det begränsade antalet laddpunkter är fyllda, och det finns fler lastbilar som ska laddas, kommer en kö bildas. Den köprincip som appliceras är *Först In Först Ut*, där den lastbil som väntat längst är den första i kön till att använda en ledig laddpunkt. Det som i detta scenario kommer presenteras i resultatväg, utöver det som presenteras för övriga scenarier, är den genomsnittliga tiden en lastbil står och väntar i denna kö till laddpunkten.

Scenario 4 avser utreda samma parametrar som i *Scenario 1* och *2*, men vid delvis elektrifiering snarare än full elektrifiering. Här begränsas således inte elektrifieringsgraden av räckvidden, utan snarare så väljs ett gränsvärde för sträckan som ska elektrifieras. I detta fall antas de 30 % kortaste sträckorna som körs vara elektrifierade, samt terminaltransporter inom räckvidden i

de fall där terminaltransporter förekommer. Detta fall grundas i att det i början kommer vara dessa som anses vara de lägst hängande frukterna, det vill säga enklast och säkrast att elektrifiera de kortaste transporterna. Siffran 30 % är godtyckligt vald, och kommer utredas vidare i känslighetsanalysen. Terminaltransporter anses förutsägbara och därför relativt väl anpassade för elektrifiering, vilket medföljer detta antagande. I övrigt är detta scenario likt *Scenario 1*, vad gäller laddeffekt och inga begränsningar i laddpunkter.

Eftersom simuleringsmodellen som appliceras använder sig av stokastiska inslag på två av inparametrarna, så kommer en simulering inte ge någon indikation på medeffektbehovet. Således kommer 10 simuleringar med samma förutsättningar att utföras när modellen appliceras på de fall och scenarier som studeras, för att både kunna studera medelvärdet av fler typiska dygn och de toppar som slumpen ger upphov till. Det går att argumentera att med 10 simuleringar så kan med relativ säkerhet medelvärdet av dessa presenteras som representativa. Däremot, tack vare det stokastiska inslaget i såväl dygnsfördelningen som den körda sträckan, så finns en större felmarginal att variationen upp och ner inte blir lika statistiskt tillförlitliga. De övre och undre variationerna kommer ha ett stort beroende av slumpen, och ger därför inte lika tillförlitliga svar som medelvärdet. Trots detta valdes 10 simuleringar. Detta val grundas i en avvägning mellan den statistiska säkerheten, som just nämnt, och hur tung simuleringen skulle bli. Hade fler simuleringar gjorts hade simuleringstiderna ökat kraftigt.

I tabell 1 redovisas egenskaper och parametrar som antas i samtliga simuleringar. Den batterielektriska lastbilens egenskaper, såväl batteriets energikapacitet som laddeffekten i grundfallet (*Scenario 1*), baseras på Scantias batterielektriska lastbilar och vars specifikationer redovisas av Scania [23]. Energikonsumtionen för en batterielektrisk lastbil vid applicering inom skogsnäringens transporter är svår att förankra i verkliga data, då det i full skala inte har testats och data är således otillgänglig. De värden på förbrukning vid lastat respektive olastat tillstånd som redovisas i tabell 1, är således framtagna i samråd med forskare inom området². Lastvolymen är 50 m^3 och är omräknad från den typiska lastvikt som en 64-tons timmerlastbil kan lasta[20]. De kriterium för laddning som presenteras i tabell 1 är godtyckligt valda och ska representera ett beslut som görs för att endast ladda de lastbilar som verkligen behöver ladda för att klara nästa uppdrag. Att terminaltransportens kriterium är något lägre grundar sig i att dessa uppdrag anses utföras i högre utsträckning av lastbilar som är dedikerade till just den sträckan mellan terminalen och industrin. Detta resulterar i att lastbilens nästa uppdrag är mer förutsägbart och således blir det också mer förutsägbart när nästa laddning kan ske.

Tabell 1: *Ingående parametrar i simuleringsmodellen. Bland annat redovisas de batterielektriska lastbilarnas egenskaper, samt kriterier för laddning.*

Parameter	Förklaring	Värde	Enhet
$E_{kapacitet,batteri}$	Energikapacitet lastbilsbatteri	468	kWh
$E_{forb,lastad}$	Energikonsumtion lastbil lastad	2,5	kWh/km
$E_{forb,olastad}$	Energikonsumtion lastbil olastad	1,5	kWh/km
V_{last}	Lastvolym timmerlastbil	50	m^3
$d_{rackvidd}$	Räckvidd batterielektrisk lastbil	228,3	km
X_1	Kriterium för laddning	50	% SOC
X_2	Kriterium för laddning (Terminaltransporter)	20	% SOC

De scenarier som beskrivs ovan appliceras på totalt tre stycken fall. Först och främst studeras två olika industrier, med en geografisk spridning. Den första industrin som studeras är en

²Daniel Noreland, Skogforsk, [2023-03-16], intervju

massaindustri, som ligger i norra Sverige. Den andra industrin som studeras är en massaindustri i södra Sverige. Vidare utförs även en analys på en terminal, som även den ligger norra Sverige. Dessa studerade platser beskrivs mer ingående nedan, i sektionerna 3.2.1, 3.2.2 och 3.2.3. Valet av dessa platser gjordes delvis med avseende på den geografiska spridningen. Att välja en industri i norra och en i södra Sverige är intressant, eftersom transportavstånden tenderar att variera där norra Sverige överlag tenderar att ha längre transportavstånd[5]. Däremot var valet av undersökta platser, både industrier och terminaler, något begränsat av tillgängligheten av data. De specifika industrierna som studeras är båda bland de 10 största i Sverige, vad gäller inflöde av massaved³.

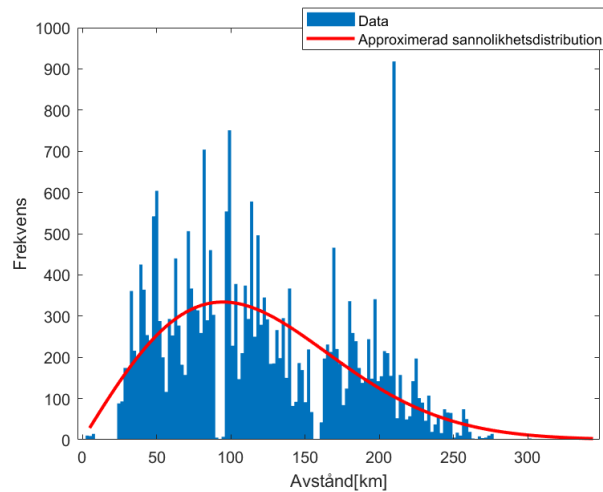
3.2.1 Effektbehovet på *Industri 1*

För att utreda effektbehovet vid snabbbladdning av den vägtransportflotta som förser *Industri 1* med dess råvara, görs en del antaganden. Först och främst görs antagandet att den laddinfrastruktur som krävs rent fysiskt kommer få plats på massabrukets avlastningsplats. Det finns en del utmaningar kopplat till just hur laddningen ska ske. Bland annat när i lossnings-processen som lastbilen ska laddas för att processen ska bli så tidseffektiv som möjligt, det vill säga under lossning, innan lossning när lastbilen köar, eller efter lossning. Dessa utmaningar kommer bortses från i denna studie.

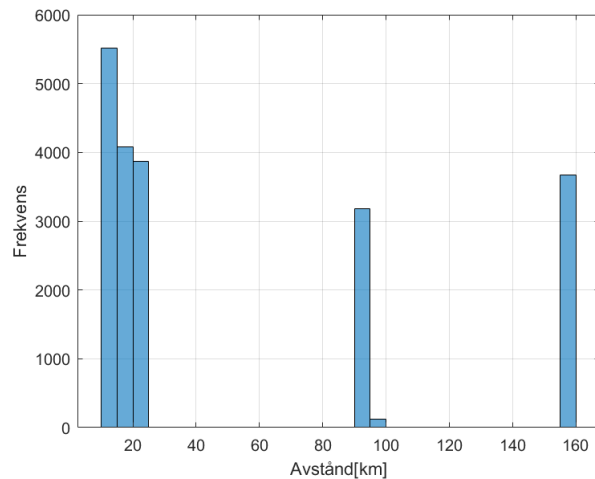
Vidare, påverkas modelleringen i detta fall av att det finns ett antal olika terminaler och industrier som förser denna industri med skogsråvara. Det är således en betydande del av den inkommande volymen skogsråvara som kommer från flöde C, samtidigt som en stor del kommer från flöde A, se figur 1

Den data som ligger till grund för såväl när lastbilarna ska skapas, som hur långt de antas ha åkt, visas i figurerna 6 och 8. I figur 6 visas en sammanställning över de olika avstånden (de blåa staplarna) som lastbilarna i verkligt fall åkt, och hur vanligt förekommande de olika avstånden är. Den röda linjen symboliserar den avbildade Rayleigh-fördelningen som används i prediktionen av avståndet i modellen, se ekvation 3. Det som inte redovisas i figur 6 är data från terminaltransporterna, då dessa är utplockade och hanterade separat. De avstånd som terminaltransporterna antar visas som luckor i de blå staplarna i figur 6, och visas istället separat i figur 7. Vidare presenteras i figur 8 hur det totala antalet lastbilar fördelas vad gäller ankomsttid, över en period på 24 timmar och med en upplösning på 15 minuter. Denna data används således som grund till det antal lastbilar som skapas i den händelsestyrda modellen, se ekvationerna 1 och 2.

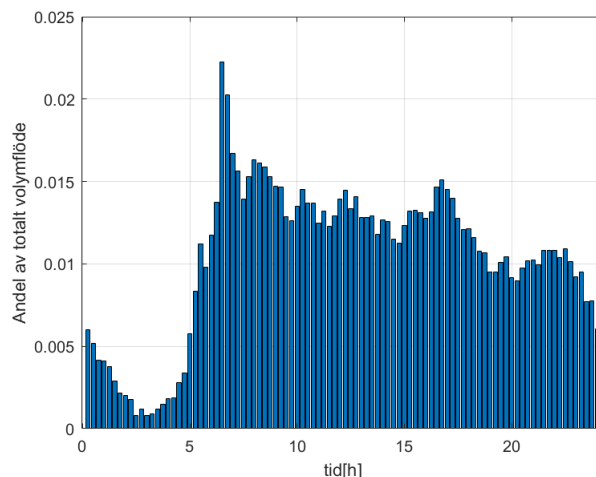
³Thomas Parklund, Skogforsk, [2023-05-26], personlig kontakt.



Figur 6: I blått visas data över inkommande lastbilars körda sträcka vid ankomst till industri 1. X-axeln visar sträckan som lastbilen kört lastad till ankomstplatsen, och y-axeln visar frekvensen av den givna sträckan i de datapunkter som analyserats. I detta fall är terminalsträckorna borttagna och separat hanterade. Den röda linjen visar Rayleighfördelningen som avbildar datan, för att sedan användas i prediktionen av avståndet i modellen.



Figur 7: Data över de fyra separata terminalkörningarna, hur frekventa dessa transporter är och vilka avstånd de antar. Avstånden på terminalkörningarna är 13, 22, 90 och 155 km enkel väg.



Figur 8: Fördelningen av de inkommande lastbilarnas ankomsttider till industri 1 över en 24-timmars period, med en tidsupplösning på 15 minuter. X-axeln visar tid för ankomst, och y-axeln visar hur stor andel av det totala antalet lastbilar som enligt data ankommer en viss tid på dygnet.

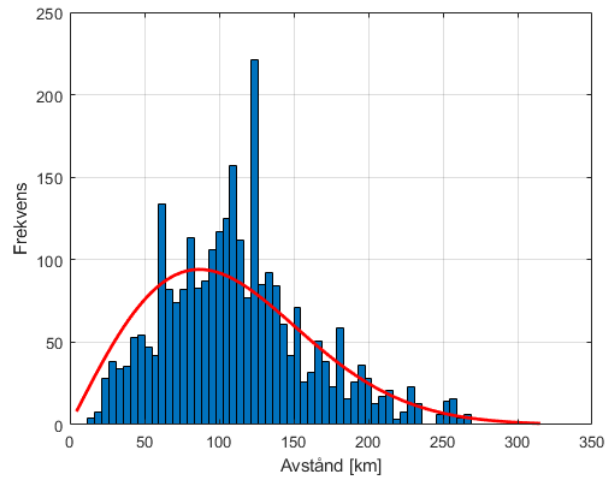
I tabell 2 redovisas även det dagliga inflöde av skogsråvara som antas komma till denna industri, och som används som indata i den simuleringsmodell som predikterar effektbehovet, och som redovisas i sektion 3.1. Det dagliga inflöde antas i detta fall till 6800 m^3 .

3.2.2 Effektbehovet på *Industri 2*

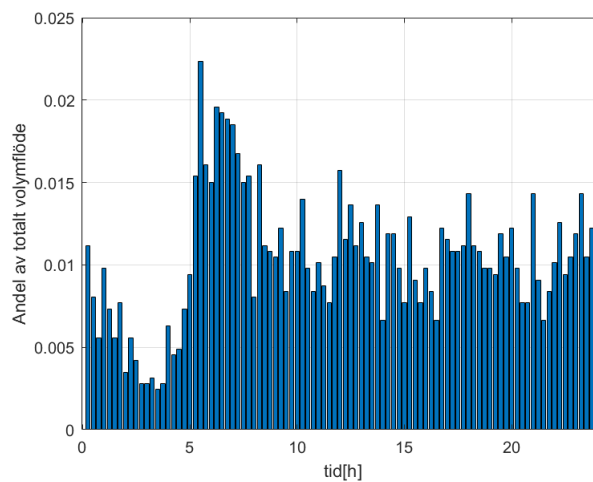
För att simulera effektbehovet hos *industri 2* från den givna laddinfrastrukturen är metoden densamma som för *industri 1*, men där indatat anses annorlunda ur flera aspekter. Först och främst baseras avstånds-datan på en månad, snarare än ett år, som i de andra fallen. Vidare så baseras ankomst-datan på data från ett antal liknande industrier i en annan del av Sverige, då detta inte fanns tillgängligt för den specifika platsen. Dessutom, baserat på den data för transportavstånd som använts för denna plats, antyder denna inga tydliga variationer som skulle tyda på dominerande terminaltransporter. Således antas i detta fall inga specifika terminaltransporter, som i fallet för *industri 1*, utan allt faller i metoden under transporter från avlägg. Således görs antagandet att simuleringen av effektbehovet på *industri 2* exkluderar metoden för att behandla terminaltransporter separat.

För att bestämma effektbehovet med hjälp av den simuleringsmodell som beskrivs i sektion 3.1, krävs även för denna industri data på dagligt inflöde av skogsråvara. Inflödet för *industri 2* ges av data, och är i detta fall 4654 m^3 , se tabell 2.

Vidare behövs även data för ankomsttid och avstånd, varav det sistnämnda redovisas i figur 9. Precis som beskrivet i sektion 3.2.1, så visas i figur 9 avstånden som lastbilarna har åkt lastade vid ankomst till industri 2, i blått. Den röda linjen är således den fördelningsfunktion som avbildar fördelningen av de olika avstånden, och som används i modellen för prediktion av den körda sträckan i modellen. Vad gäller data över ankomsttider, som för fallen *industri 1* och *terminalen* redovisas i figurerna 8 respektive 12, har denna inte funnits tillgänglig för *industri 2*. Det som istället använts i detta fall är data över ankomsttider från ett antal massabruk i en annan region än den som studeras i detta fall. Denna region anses dock vara relativt lik den som studeras, och därför görs antagandet att datan är någorlunda representativ i detta fall. Den data som i detta fall använts redovisas i figur 10.



Figur 9: I blått visas data över inkommande lastbilars körda sträcka vid ankomst till industri 2. X-axeln visar sträckan som lastbilen kört lastad till ankomstplatsen, och y-axeln visar frekvensen av den givna sträckan i de datapunkter som analyserats. Den röda linjen visar Rayleighfördelningen som avbildar datan, för att sedan användas i prediktionen av avståndet i modellen.



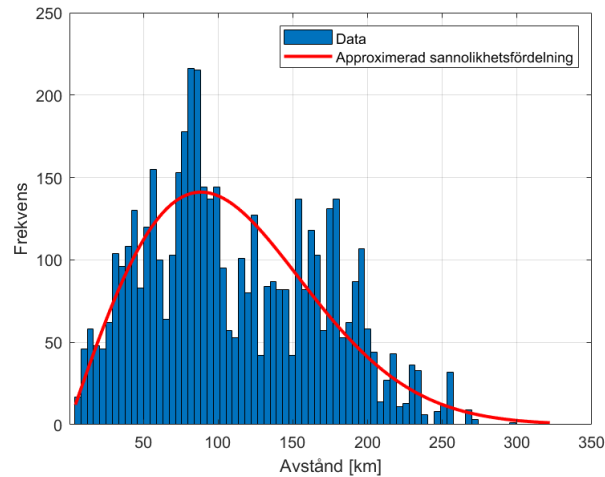
Figur 10: Fördelningen av de inkommande lastbilarnas ankomsttider till industri 2 över en 24-timmars period, med en tidsupplösning på 15 minuter. X-axeln visar tid för ankomst, och y-axeln visar hur stor andel av det totala antalet lastbilar som enligt data ankommer en viss tid på dygnet.

3.2.3 Effektbehovet på *Terminal*

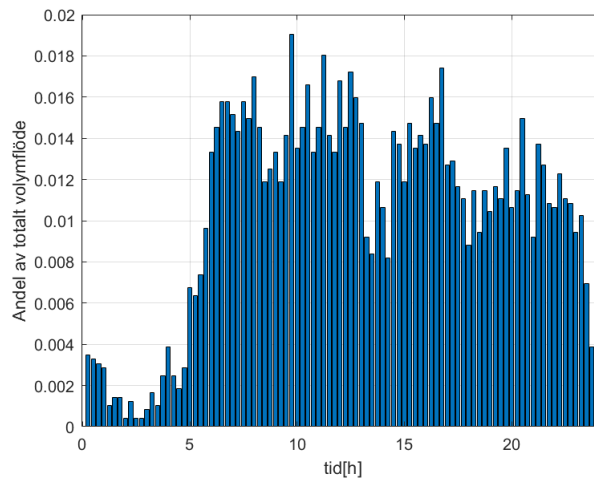
För att simulera effektbehovet hos *terminalen* kommer samma metod som för de båda industrierna att appliceras. Det som framförallt skiljer detta fall från det som beskrivs ovan, i sektion 3.2.1, är att terminalen inte antar några terminaltransporter. Detta betyder att samtliga transporter antas komma från diverse avlägg. Metoden för simulering sker således enligt sektion 3.1, men exkluderar den delen av modellen som behandlar terminaltransporter.

Det dagliga inflödet av skogsråvara från vägtransporter till *terminalen* antas i detta fall vara 7800 m^3 , se tabell 2.

Precis som i sektion 3.2.1 och 3.2.2 så redovisas i figurerna 11 och 12 datan som ligger till grund för såväl prediktering av avstånd och tid för ankomst i den händelsestyrda modellen.



Figur 11: I blått visas data över inkommande lastbilars körda sträcka vid ankomst till terminalen. X-axeln visar sträckan som lastbilen kört lastad till ankomstplatsen, och y-axeln visar frekvensen av den givna sträckan i de datapunkter som analyserats. Den röda linjen visar Rayleighfördelningen som avbildar datan, för att sedan användas i prediktionen av avståndet i modellen.



Figur 12: Fördelningen av de inkommande lastbilarnas ankomsttider till terminalen över en 24-timmars period, med en tidsupplösning på 15 minuter. X-axeln visar tid för ankomst, och y-axeln visar hur stor andel av det totala antalet lastbilar som enligt data ankommer en viss tid på dygnet.

3.2.4 Ingående parametrar och indata

I tabell 2 redovisas för varje fall som beskrivits ovan, det vill säga *Industri 1*, *Industri 2* och *Terminal*, de ingående parametrarna och datan som ligger till grund för de simuleringar som görs i varje *scenario*. Av konfidentialitetsskäl kommer inte all indata som ligger till grund för simuleringen, och inte heller källan till den data som visas i denna rapport att redovisas.

Tabell 2: Ingående parametrar och indata, uppdelat i de olika fallstudierna, industri 1 och 2 samt terminalen.

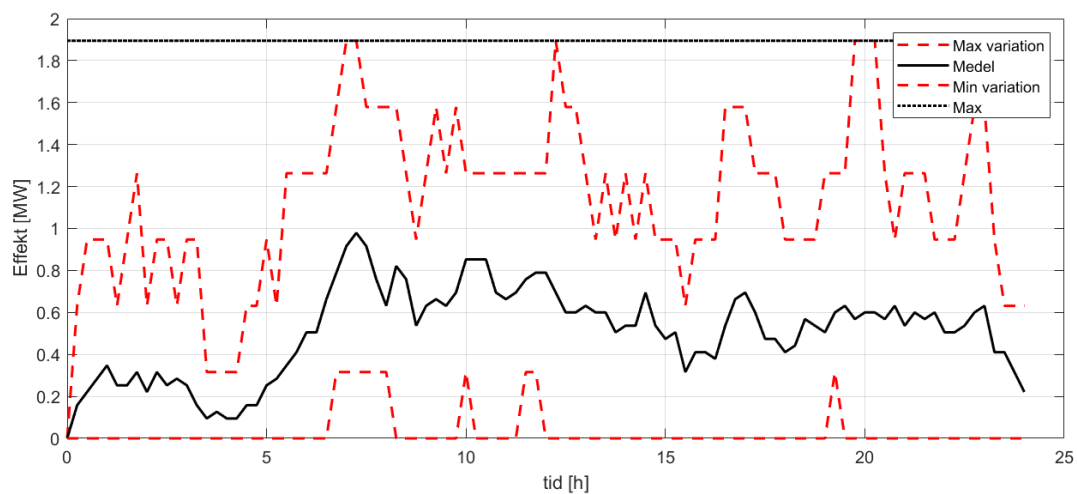
Parameter	Värde	Enhet
Industri 1		
Dagligt inflöde av skogsråvara via lastbil, V_{in}	6800	m^3
Förväntat antal inkommande lastbilar per dygn	136	st
Avstånd till <i>terminalkörning 1</i>	13	km
Avstånd till <i>terminalkörning 2</i>	22	km
Avstånd till <i>terminalkörning 3</i>	90	km
Avstånd till <i>terminalkörning 4</i>	155	km
Industri 2		
Dagligt inflöde av skogsråvara via lastbil, V_{in}	4654	m^3
Förväntat antal inkommande lastbilar per dygn	93	st
Terminal		
Dagligt inflöde av skogsråvara via lastbil, V_{in}	7800	m^3
Förväntat antal inkommande lastbilar per dygn	156	st

4 Resultat

Nedan följer resultaten av det simulerade effektbehovet hos de olika platser som studeras, med de olika *Scenarie*-uppdelningarna som presenteras i sektion 3.2. Resultaten från de olika *scenarierna* kommer att presenteras var för sig, och kommer visa sammanställda simuleringsresultat från samtliga fallstudier, det vill säga *industri 1*, *industri 2* och *terminal*. Detta för att möjliggöra en tydlig jämförelse av de olika resultaten.

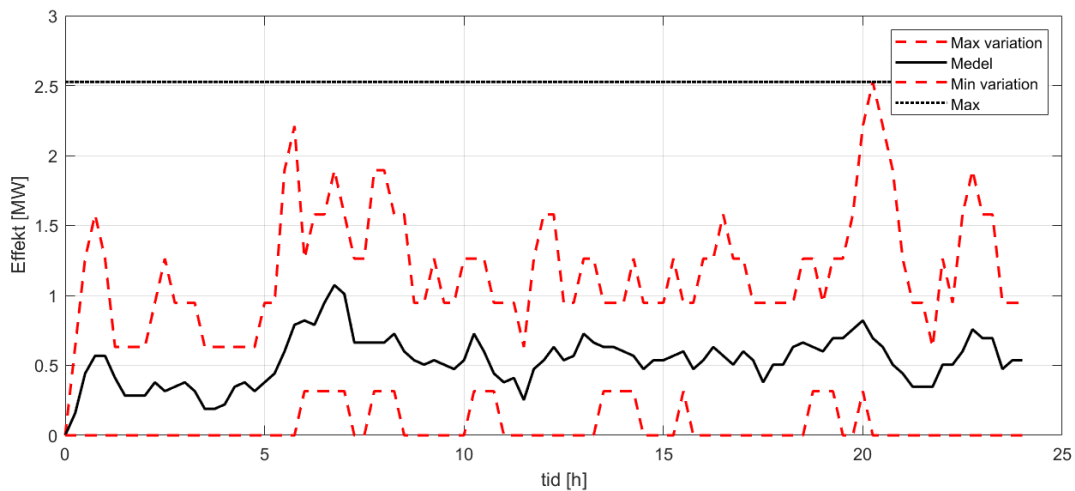
4.1 Scenario 1

Resultaten av simuleringar som gjorts i scenario 1 visas i figurerna 13, 14 och 15, samt i tabell 3. Figurerna visar resultatet av 10 simuleringar av effektbehovet hos laddinfrastrukturen som krävs för den elektrifieringsgrad som antas. I detta fall alla transporter som skapas och antas ha kört kortare eller lika långt som räckvidden hos en batterielektrisk lastbil, se tabell 1. Detta effektbehov är fördelat över ett dygn, och visas med en tidsupplösning på 15 min. I figurerna visas således ett antal resultat från de 10 simuleringarna. Den svarta heldragna linjen indikerar medelvärdet av effektbehovet från de 10 simuleringarna i varje tidssteg. De två streckade röda graferna indikerar det största (ovanför den svarta heldragna linjen) och det minsta (under den svarta heldragna linjen) värdet från de 10 simuleringarna. Dessutom indikeras det största värdet som uppnåtts av simuleringarna, av den svarta prickiga linjen. Detta värde anges även i tabell 3, tillsammans med hur många laddare detta anses motsvara.



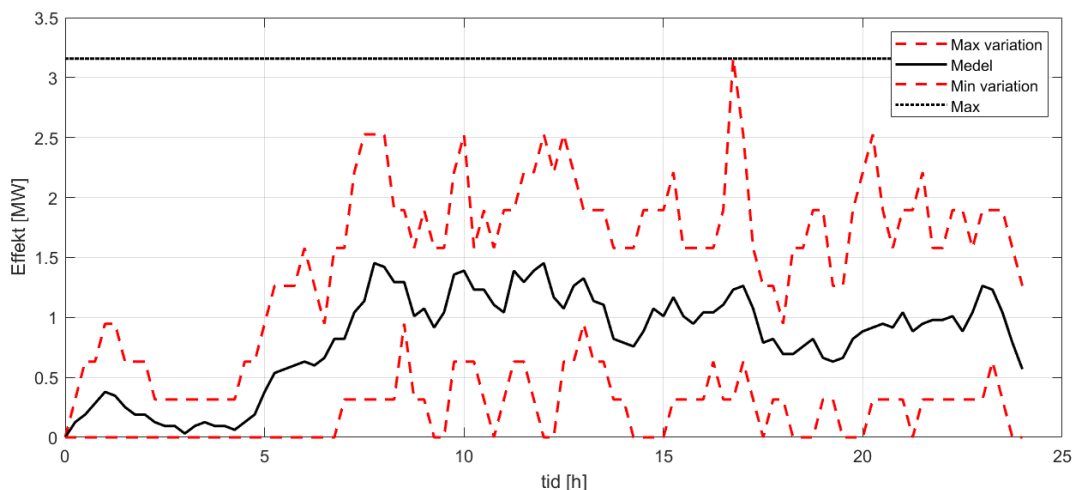
Figur 13: Resultatet från simulering av ett dygns effektbehov vid industri 1 enligt scenario 1:s specifikationer. Simuleringen är gjord 10 gånger med samma förutsättningar, och grafen visar det högsta och minsta värdet i varje tidssteg (rött) samt medelvärdet av alla 10 simuleringar (svart heldragen linje). Dessutom visas den maximala effekten som uppnås under 10 simuleringar (svart prickad linje).

I figur 13 kan effektbehovet för industri 1 utläsas. Det går att utläsa en trend hos medelvärdet (den svarta linjen) som indikerar ett lågt effektbehov de tidiga timmarna om dygnet, men som runt klockan 06 på morgonen ökar något. Det går att utläsa en pik i effektbehovet på förmiddagen, och sedan en relativt jämn nivå utefter dygnets resterande timmar. Det går även att utläsa de pika som ger den högsta effekten som dessa 10 dygn uppnår, se tabell 3, som uppnås flera gånger under dessa dygn som simuleringen avser.



Figur 14: Resultatet från simulering av ett dygns effektbehov vid industri 2 enligt scenario 1:s specifikationer. Simuleringen är gjord 10 gånger med samma förutsättningar, och grafen visar det högsta och minsta värdet i varje tidssteg(rött) samt medelvärdet av alla 10 simuleringar(svart heldragen linje). Dessutom visas den maximala effekten som uppnås under 10 simuleringar(svart prickad linje).

Vidare kan i figur 14 effektbehovet för industri 2 utläsas. I jämförelse med effektbehovet hos industri 1 i figur 13, så ger figur 14 ett mer jämnt fördelat intryck, med en något högre pik under morgonen. Däremot verkar de högsta värdena på effekten vid industri 2 nå högre nivåer än för industri 1, vilket också visas i tabell 3, där både maximala effektbehovet och antal laddare är högre för industri 2.



Figur 15: Resultatet från simulering av ett dygns effektbehov vid terminalen enligt scenario 1:s specifikationer. Simuleringen är gjord 10 gånger med samma förutsättningar, och grafen visar det högsta och minsta värdet i varje tidssteg(rött) samt medelvärdet av alla 10 simuleringar(svart heldragen linje). Dessutom visas den maximala effekten som uppnås under 10 simuleringar(svart prickad linje).

I figur 15 kan terminalens effektbehov utläsas. Detta verkar följa någorlunda samma mönster som för industri 1, i figur 13, men med något tydligare nedgång under de första timmarna på dygnet, och med ett allmänt högre effektbehov under dagen. Det maximala effektbehovet på terminalen, och således även antalet laddare som behövs, är högre än för båda industrierna, se

även tabell 3.

I tabell 3 visas övriga resultat som anses intressanta för studien, för samtliga fallstudier. Utöver det som nämnts tidigare, det vill säga det maximalt effektbehov och antal laddare som behövs för att förse denna, presenteras här en del andra resultat. Bland annat den totala energiförbrukningen för ett dygn, genomsnittlig laddtid och det genomsnittliga avståndet som en lastbil i de olika simuleringarna har åkt när de kommer in till industrin i detta fall. Dessutom redovisas i tabell 3 hur stor andel av de transporter som i simuleringen skapas, som anses kunna elektrifieras, givet att lastbilen har kört en kortare sträcka än vad en batterielektrisk lastbil anses ha för räckvidd, se tabell 1. Detta kan även jämföras med andelen transportarbete som under samma antagande kan elektrifieras, vilket också redovisas i tabellen.

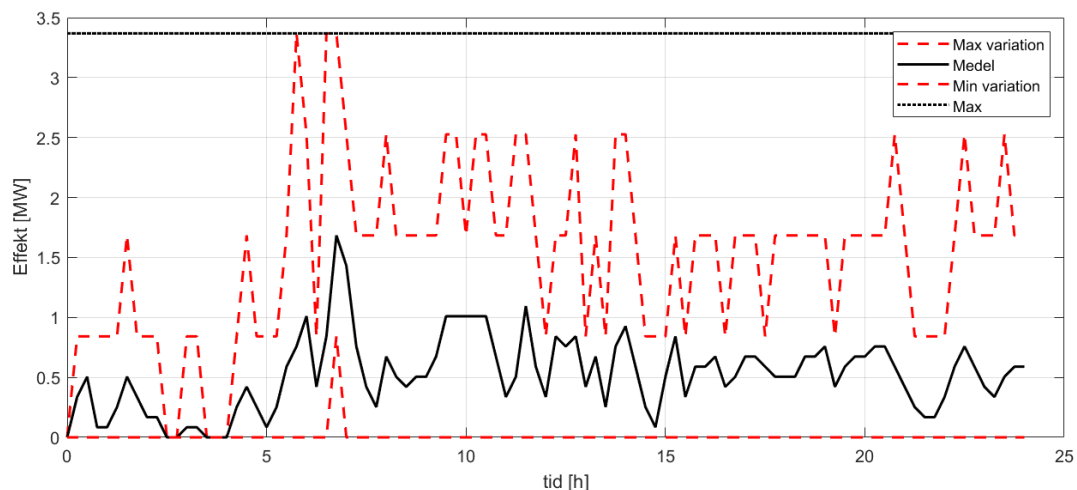
Tabell 3: *Resultat från simulering av industri 1, industri 2 och terminal utifrån scenario 1:s betingelser.*

Resultat	Industri 1	Industri 2	Terminal	Enhet
Energiförbrukning	49,0	51,2	78,7	MWh/d
Maximalt effektbehov	1,89	2,53	3,16	MW
Antal laddare	6	8	10	st
Andel elektrifierade lastbilar	78,1	64,0	63,0	%
Andel elektrifierat transportarbete	60,8	49,5	43,4	%
Genomsnittlig laddtid	55	51	52	minuter
Medeltransportavstånd	177	197	202	km

Som nämnt tidigare verkar terminalen ha ett allmänt högre effektbehov än de båda industrierna, vilket också visas i antalet laddare som behövs såväl som i energiförbrukningen i tabell 3. Däremot verkar det finnas en trend hos industri 1, att elektrifieringsgraden tenderar att vara ungefär 10 procentenheter högre än för industri 2 och terminalen, både vad gäller andel lastbilar och andel transportarbete. Transportarbetet som kan elektrifieras är allmänt lägre än andelen lastbilar som kan elektrifieras i samtliga fall, eftersom de transporter som inte elektrifieras är de transporter som kör längst. Den förväntade laddtiden ligger i ungefär samma storleksordning för samtliga fallstudier, men det skiljer sig några minuter mellan fallen. Vad gäller medeltransportavståndet så verkar transporterna till industri 1 uppvisa ett allmänt kortare medelavstånd, medans medelavståndet hos industri 2 och terminalen är relativt lika.

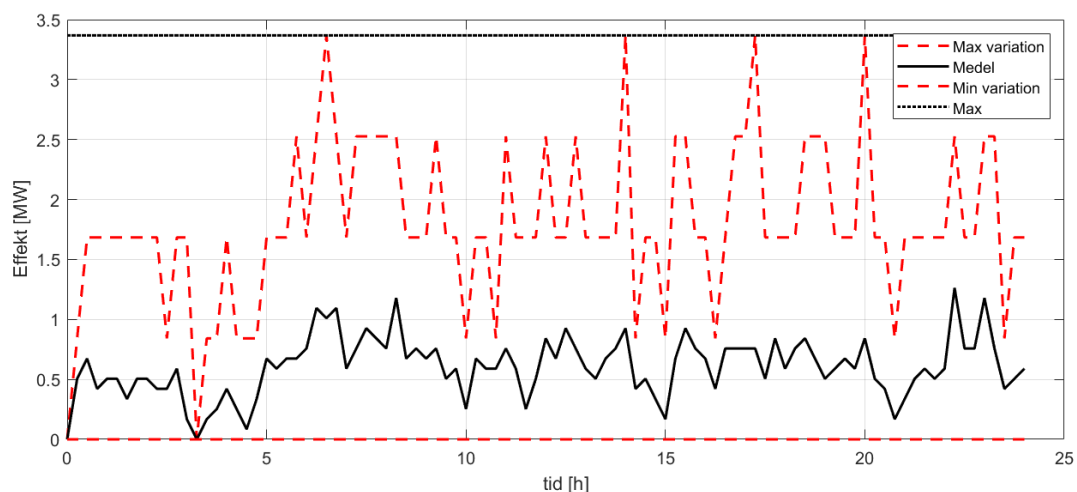
4.2 Scenario 2

Nedan följer resultaten av de simuleringar som gjorts i de tre fallstudierna med scenario 2:s antaganden. I figurerna 16, 17 och 18 visas effektbehoven under den 24 timmars period som simuleringen avser. Vidare redovisas även övriga resultat i tabell 4.



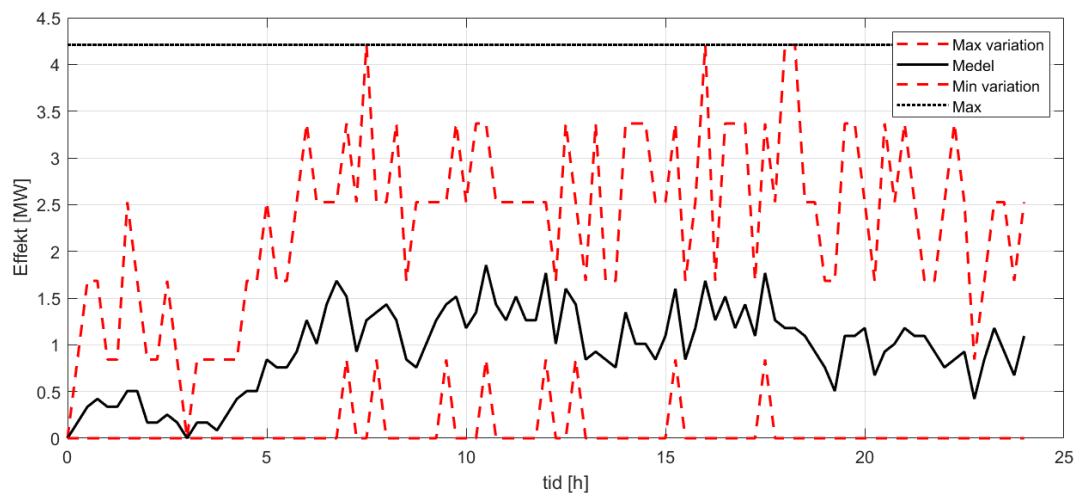
Figur 16: Resultatet från simulering av ett dygns effektbehov vid industri 1 enligt scenario 2:s specifikationer. Simuleringen är gjord 10 gånger med samma förutsättningar, och grafen visar det högsta och minsta värdet i varje tidssteg(rött) samt medelvärdet av alla 10 simuleringar(svart heldragen linje). Dessutom visas den maximala effekten som uppnås under 10 simuleringar(svart prickad linje).

Effektbehovet hos industri 1 kan studeras i figur 16. Medelvärdet av effektbehovet under de 10 simuleringsdygnet, det vill säga den svarta heldragna linjen, kan ses fluktuera en del, både under de första timmarna på dygnet där effektbehovet är allmänt lågt, men även under de resterande timmarna där belastningen är större. En tydlig och hög pik syns runt sjutiden på morgonen, och det är även då som det högsta värdet på effektbehovet uppnås.



Figur 17: Resultatet från simulering av ett dygns effektbehov vid industri 2 enligt scenario 1:s specifikationer. Simuleringen är gjord 10 gånger med samma förutsättningar, och grafen visar det högsta och minsta värdet i varje tidssteg(rött) samt medelvärdet av alla 10 simuleringar(svart heldragen linje). Dessutom visas den maximala effekten som uppnås under 10 simuleringar(svart prickad linje).

Effektbehovet hos industri 2, som visas i figur 17, visar en mer jämt fördelad profil, i jämförelse med det som visas i figur 16. Den uppnår visserligen samma maximala effekt som industri 1, se tabell 4, men under fler tidpunkter som är mer fördelade under det simulerade dygnet.



Figur 18: Resultatet från simulering av ett dygns effektbehov vid terminalen enligt scenario 1:s specifikationer. Simuleringen är gjord 10 gånger med samma förutsättningar, och grafen visar det högsta och minsta värdet i varje tidssteg(rött) samt medelvärdet av alla 10 simuleringar(svart heldragen linje). Dessutom visas den maximala effekten som uppnås under 10 simuleringar(svart prickad linje).

Till sist kan i figur 18 effektbehovet för terminalen utläsas. Medelvärdet av effektbehovet antar här en tydlig uppgång under morgontimmarna, runt klockan 05, och antar en relativt jämn form under dagen, med en knapp nedgång under kvällstimmarna, ungefär vid klockan 18. Den maximala effekten uppnås flera gånger, och sprids någorlunda mellan tidig morgon och sen eftermiddag.

I tabell 4 redovisas övriga resultat från scenario 2, bland dessa energiförbrukningen, maximala effektbehovet, elektrifieringsgraderna samt laddtiden.

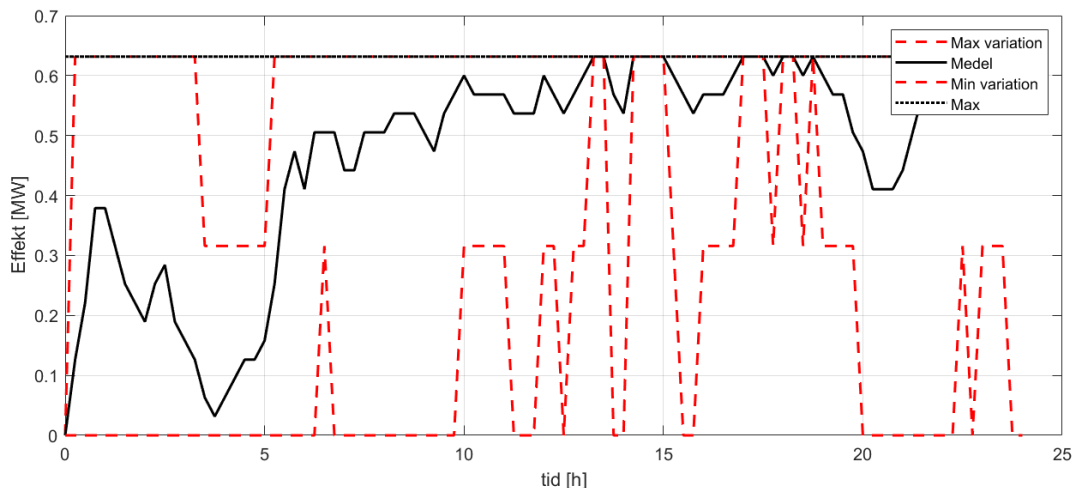
Tabell 4: Resultat från simulering av industri 1, industri 2 och terminal utifrån scenario 2:s betingelser.

Resultat	Industri 1	Industri 2	Terminal	Enhet
Energiförbrukning	49,9	58,1	91,6	MWh/d
Maximalt effektbehov	3,37	3,37	4,21	MW
Antal laddare	4	4	5	st
Andel elektrifierade lastbilar	75,2	65,0	64,5	%
Andel elektrifierat transportarbete	52,4	47,6	47,0	%
Genomsnittlig laddtid	20	19	19	minuter
Medeltransportavstånd	178	196	201	km

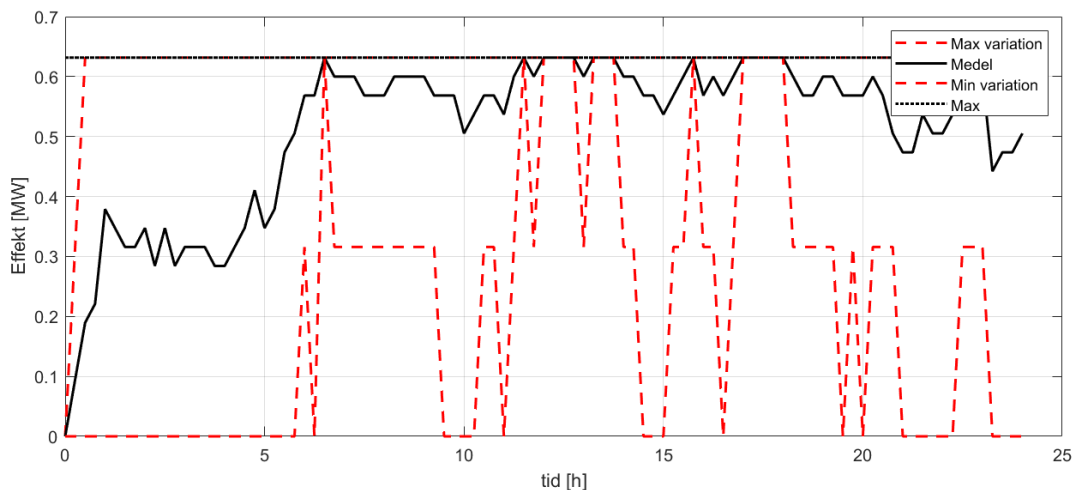
Resultaten som avser det maximala effektbehovet för de olika fallstudierna i scenario 2 antar ett jämt värde på över 3 MW, i fallet för terminalen dessutom över 4 MW. Detta fördelas ut på respektive 4 och 5 laddare. Energiförbrukningen för terminalen är i detta fall i storleksordningen 30 till 40 MWh större än för respektive industri. Laddeffekten som antas den maximala som batteriet kan ta emot är här 1 MW, som beskrivet i sektion 3.2. De genomsnittliga laddtiderna för detta scenario verkar för samtliga fall som visas i tabell 4 vara runt 20 minuter för snabbaddning.

4.3 Scenario 3a

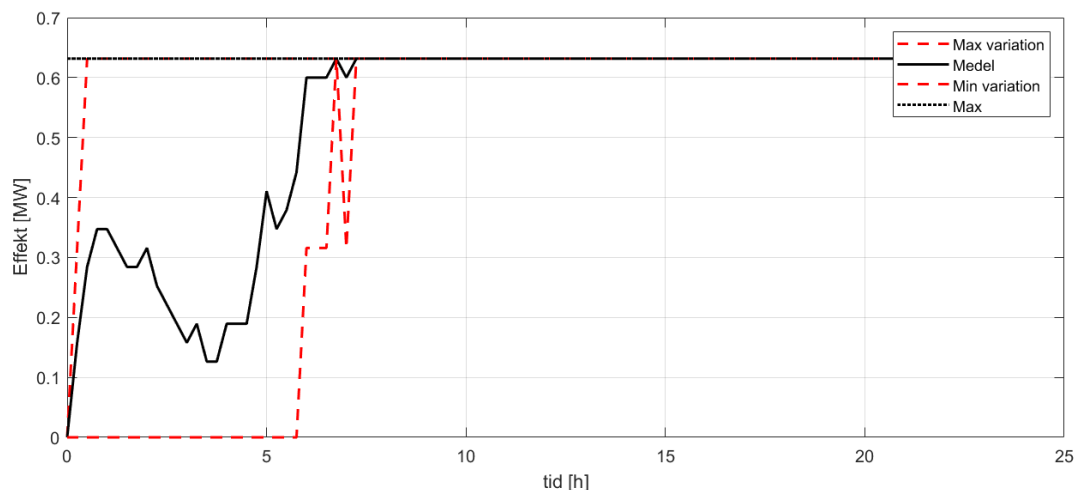
I figurerna 19, 20 och 21 samt tabell 5 visas samtliga resultat från simuleringarna av scenario 3a, där en begränsning i antalet laddare appliceras. I detta scenario begränsas laddarna till 2 stycken, vilket motsvarar en effekt på 632 kW.



Figur 19: Resultatet från simulering av ett dygns effektbehov vid industri 1 enligt scenario 3a:s specifikationer. Simuleringen är gjord 10 gånger med samma förutsättningar, och grafen visar det högsta och minsta värdet i varje tidssteg(rött) samt medelvärdet av alla 10 simuleringar(svart heldragen linje). Dessutom visas den maximala effekten som uppnås under 10 simuleringar(svart prickad linje).



Figur 20: Resultatet från simulering av ett dygns effektbehov vid industri 2 enligt scenario 3a:s specifikationer. Simuleringen är gjord 10 gånger med samma förutsättningar, och grafen visar det högsta och minsta värdet i varje tidssteg(rött) samt medelvärdet av alla 10 simuleringar(svart heldragen linje). Dessutom visas den maximala effekten som uppnås under 10 simuleringar(svart prickad linje).



Figur 21: Resultatet från simulering av ett dygns effektbehov vid terminalen enligt scenario 3a:s specifikationer. Simuleringen är gjord 10 gånger med samma förutsättningar, och grafen visar det högsta och minsta värdet i varje tidssteg(rött) samt medelvärdet av alla 10 simuleringar(svart heldragen linje). Dessutom visas den maximala effekten som uppnås under 10 simuleringar(svart prickad linje).

Vad som går att se i figurerna 19, 20 är att effektbehovet sett till medelvärdet under dagen kryper nära den effekt som anses begränsa laddningen, här bestämt av hur många laddare som finns tillgängliga. Om dessa jämförs med medeleffektbehovet för terminalen, som visas i figur 21, så är alla laddare upptagna i samtliga 10 simuleringar från ungefär klockan 07, och således är effektbehovet ekvivalent med den maximala effekten som går att få ut av dessa 2 laddare.

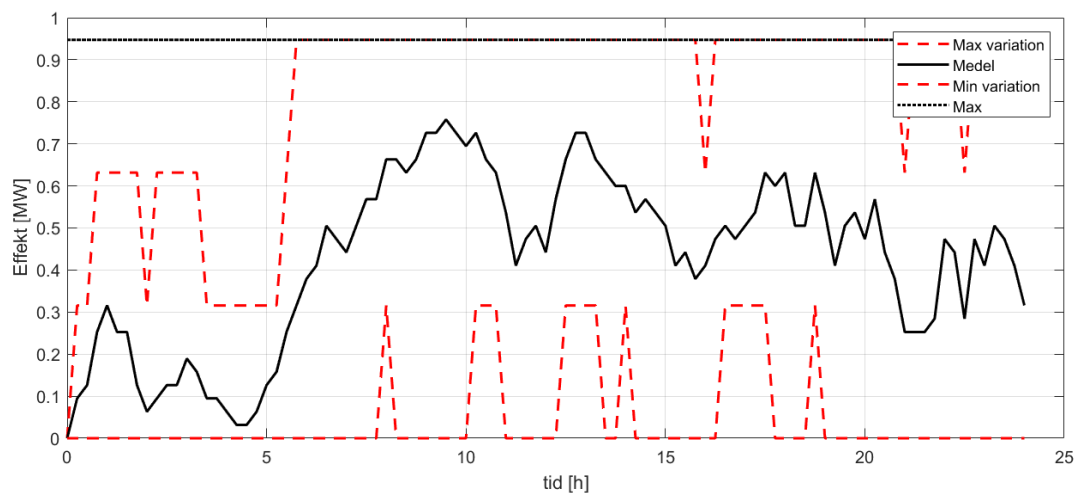
Tabell 5: Resultat från simulering av industri 1, industri 2 och terminal utifrån scenario 3a:s betingelser.

Resultat	Industri 1	Industri 2	Terminal	Enhet
Energiförbrukning	44,6	49,0	51,4	MWh/d
Maximalt effektbehov	632	632	632	kW
Antal laddare	2	2	2	st
Andel elektrifierade lastbilar	78,3	63,0	58,5	%
Andel elektrifierat transportarbete	50,4	51,2	44,7	%
Genomsnittlig laddtid	54	51	50	minuter
Genomsnittlig kötid	46	52	192 (3h 12 min)	minuter
Medeltransportavstånd	175	198	201	km

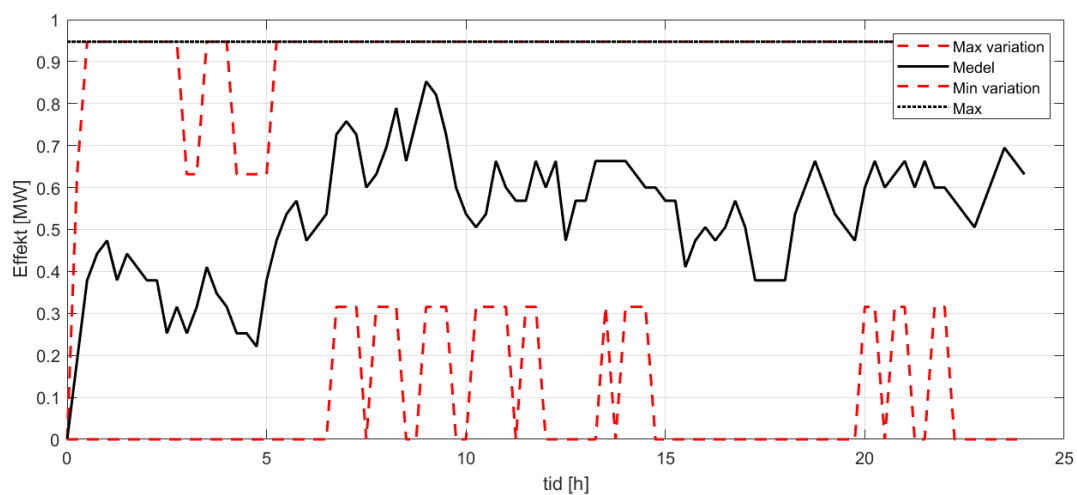
I tabell 5 visas övriga resultat från scenario 3a. I detta scenario begränsas som tidigare nämnt antalet laddare till 2, och således begränsas även det maximala effektuttaget till i detta fall 632 kW. Eftersom effekten begränsas uppåt vekar även energiförbrukningen någorlunda begränsas, och vara någorlunda liknande för de olika fallstudierna. Utöver de resultat som också visas i resultaten för scenario 1, 2 och 4, visas här också den genomsnittliga tiden som en lastbil spenderar i kö på grund av att alla laddare är upptagna. För de båda industrierna verkar denna kötid vara i relativt liknande storleksordning, ungefär runt 50 minuter, vilket går att jämföras med den genomsnittliga laddtiden på drygt 50 minuter. Däremot visar resultatet för terminalen att en lastbil i snitt måste vänta drygt 3 timmar för att få ladda i detta scenario, där endast två laddare finns att tillgå.

4.4 Scenario 3b

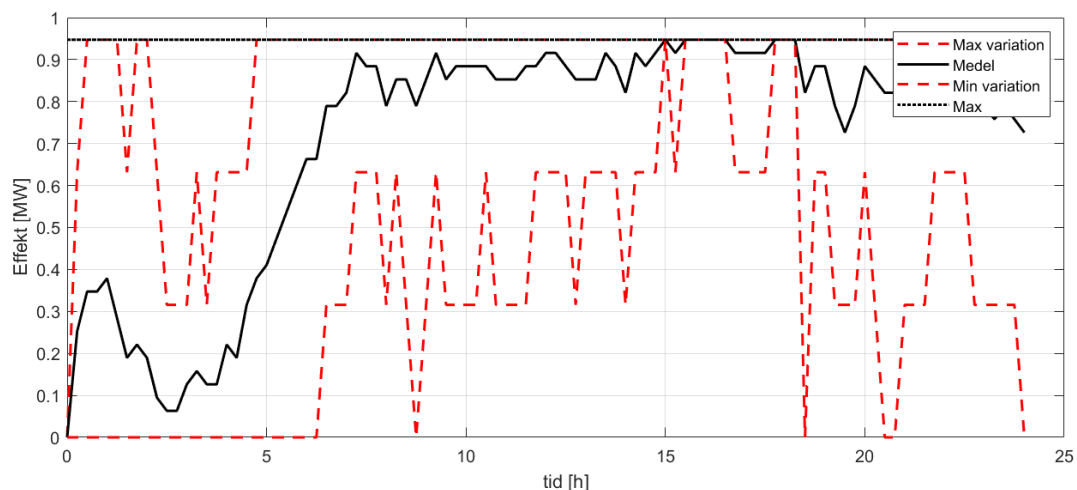
I figurerna 22, 23 och 24 samt i tabell 6, visas resultaten från scenario 3b, som antar samma struktur som scenario 3a men med tre istället för två laddare, vilket motsvarar en effekt på 947 kW.



Figur 22: Resultatet från simulering av ett dygns effektbehov vid industri 1 enligt scenario 3b:s specifikationer. Simuleringen är gjord 10 gånger med samma förutsättningar, och grafen visar det högsta och minsta värdet i varje tidssteg(rött) samt medelvärdet av alla 10 simuleringar(svart heldragen linje). Dessutom visas den maximala effekten som uppnås under 10 simuleringar(svart prickad linje).



Figur 23: Resultatet från simulering av ett dygns effektbehov vid industri 2 enligt scenario 3b:s specifikationer. Simuleringen är gjord 10 gånger med samma förutsättningar, och grafen visar det högsta och minsta värdet i varje tidssteg(rött) samt medelvärdet av alla 10 simuleringar(svart heldragen linje). Dessutom visas den maximala effekten som uppnås under 10 simuleringar(svart prickad linje).



Figur 24: Resultatet från simulering av ett dygns effektbehov vid terminalen enligt scenario 3b:s specifikationer. Simuleringen är gjord 10 gånger med samma förutsättningar, och grafen visar det högsta och minsta värdet i varje tidssteg(rött) samt medelvärdet av alla 10 simuleringar(svart heldragen linje). Dessutom visas den maximala effekten som uppnås under 10 simuleringar(svart prickad linje).

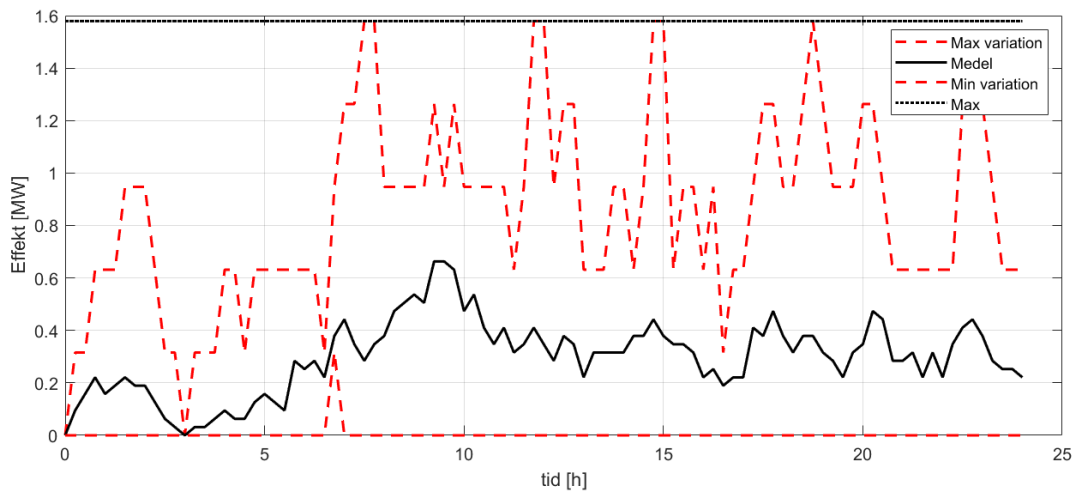
Om effektbehovet för de två industrierna, som visas i figur 22 och 23, jämförs med effektbehovet hos terminalen, som visas i figur 24, så är de båda industrierna till synes mindre begränsade av antalet laddare. Detta går att utläsa från att medeleffektkurvan (svart heldragen linje) under dagen tenderar att ligga närmre den begränsande maxeffekten (svart prickig linje) än i de två andra fallen. Detta styrks även av det som visas i tabell 6, det vill säga att den genomsnittliga kötiden som uppstår när alla tre laddare är upptagna, endast är några minuter för de två industrierna men drygt en timme för terminalen.

Tabell 6: Resultat från simulering av industri 1, industri 2 och terminal utifrån scenario 3b:s betingelser.

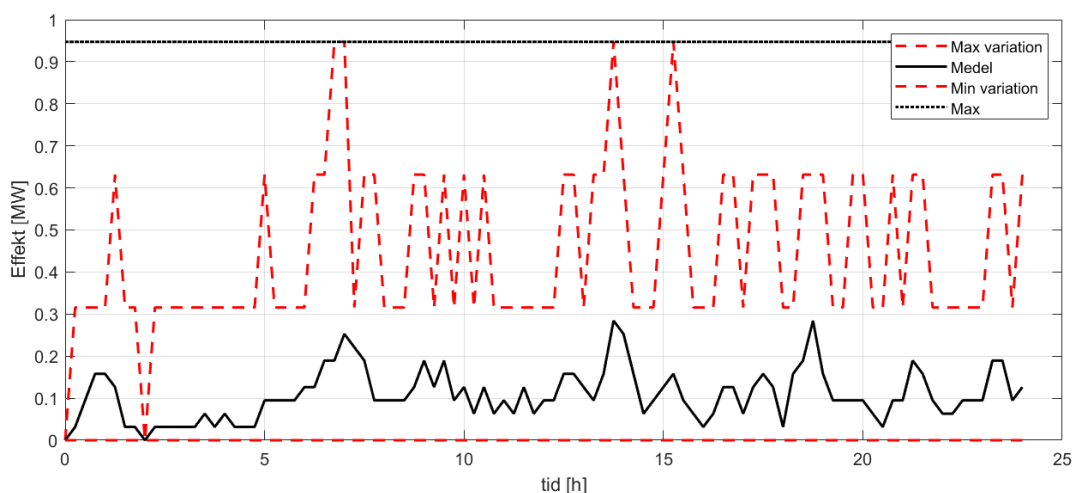
Resultat	Industri 1	Industri 2	Terminal	Enhet
Energiförbrukning	41,2	51,0	68,2	MWh/d
Maximalt effektbehov	947	947	947	kW
Antal laddare	3	3	3	st
Andel elektrifierade lastbilar	76,1	64,5	60,4	%
Andel elektrifierat transportarbete	58,2	38,1	51,4	%
Genomsnittlig laddtid	53	51	51	minuter
Genomsnittlig kötid	6	4	64 (1 h 4 min)	minuter
Medeltransportavstånd	176	195	204	km

4.5 Scenario 4

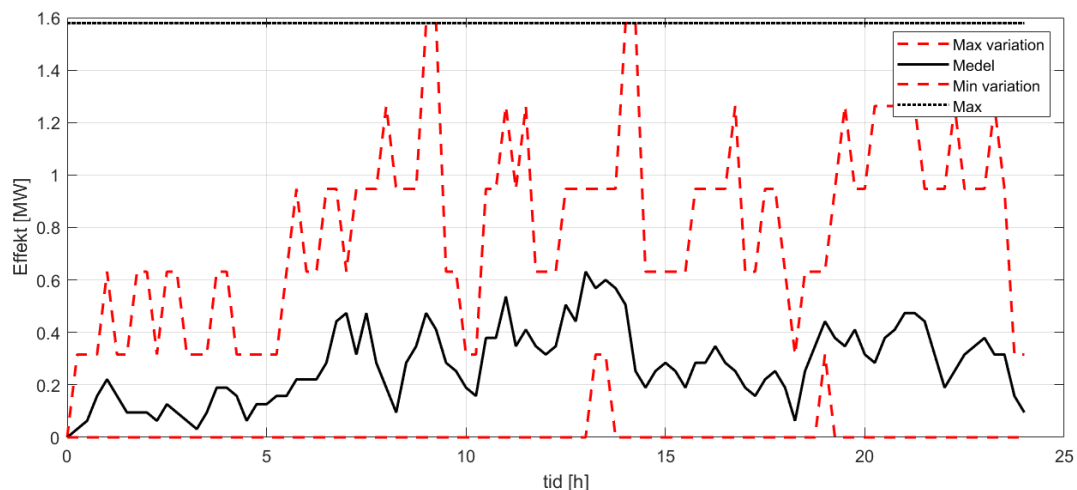
Nedan följer resultaten från simulering av scenario 4, där endast de 30 % kortaste sträckorna, samt alla terminaltransporter som faller inom räckvidden, elektrifieras. I figurerna 25, 26 och 27 samt i tabell 7 redovisas resultaten från simuleringarna från scenario 4.



Figur 25: Resultatet från simulering av ett dygns effektbehov vid industri 1 enligt scenario 4:s specifikationer. Simuleringen är gjord 10 gånger med samma förutsättningar, och grafen visar det högsta och minsta värdet i varje tidssteg(rött) samt medelvärdet av alla 10 simuleringar(svart heldragen linje). Dessutom visas den maximala effekten som uppnås under 10 simuleringar(svart prickad linje).



Figur 26: Resultatet från simulering av ett dygns effektbehov vid industri 2 enligt scenario 4:s specifikationer. Simuleringen är gjord 10 gånger med samma förutsättningar, och grafen visar det högsta och minsta värdet i varje tidssteg(rött) samt medelvärdet av alla 10 simuleringar(svart heldragen linje). Dessutom visas den maximala effekten som uppnås under 10 simuleringar(svart prickad linje).



Figur 27: Resultatet från simulering av ett dygns effektbehov vid terminalen enligt scenario 4:s specifikationer. Simuleringen är gjord 10 gånger med samma förutsättningar, och grafen visar det högsta och minsta värdet i varje tidssteg(rött) samt medelvärdet av alla 10 simuleringar(svart heldragen linje). Dessutom visas den maximala effekten som uppnås under 10 simuleringar(svart prickad linje).

Figurerna 25, 26 och 27 visar effektbehoven för respektive fallstudie. Utifrån dessa går det att utläsa en trend av allmänt låga medeleffektbehov, men där industri 1 och terminalen följs åt någorlunda. Det går att utläsa en tydligare effekttopp på förmiddagen, ungefär vid klockan 09, hos industri 1, medans effektbehovet för terminalen är någorlunda mer utspritt under dagen. Vad gäller industri 2 så är dess medeleffektbehov relativt lågt och jämt spritt över dygnet.

Tabell 7: Resultat från simulering av industri 1, industri 2 och terminal utifrån scenario 4:s betingelser.

Resultat	Industri 1	Industri 2	Terminal	Enhet
Energiförbrukning	28,6	10,4	26,6	MWh/d
Maximalt effektbehov	1,58	0,947	1,58	MW
Antal laddare	5	3	5	st
Andel elektrifierade lastbilar	69,3	32,2	40,1	%
Andel elektrifierat transportarbete	47,6	15,5	19,4	%
Genomsnittlig laddtid	49	34	38	minuter
Medeltransportavstånd	176	199	198	km

I de övriga resultaten, som visas i tabell 7, bekräftas det som nämnts ovan, att industri 1 och terminalen uppvisar likande resultat. Båda dessa uppvisar samma maxeffekt och antal laddare, samt en energiförbrukning i samma storleksordning. Däremot skiljer de sig signifikant när det kommer till elektrifieringsgraden, där industri 1 uppvisar en mycket högre elektrifieringsgrad, både med avseende på antal lastbilar och transportarbete. Industri 2 uppvisar signifikant lägre resultat vad gäller effekt och energiförbrukning, och även något lägre elektrifieringsgrad. Vidare verkar industri 1 uppvisa en längre genomsnittlig laddtid än de övriga två fallen.

5 Diskussion

I denna sektion följer diskussion kring den studie som presenteras i rapporten. Diskussionen är uppdelad i två underrubriker, där den första avser diskutera metoden som följts för att framställa resultaten, såväl som styrkor och svagheter kopplat till den simuleringsmodell som tagits fram. Vidare avser den andra underrubriken diskutera och jämföra resultaten för de olika scenarierna, och koppla dessa till metoden och de antaganden som gjorts för att nå resultaten som presenteras. I den sistnämnda underrubriken, kommer även resultatet att diskuteras utifrån relationen mellan transportsystemet och elnätet.

5.1 Metoddiskussion

Den simuleringsmodell som tagits fram i samband med denna studie och som presenteras i sektion 3.1, är framtagen ur laddinfrastrukturens och den studerade platsens perspektiv. Denna händelsestyrda simuleringsmodell, som delvis beskrivs av figur 4, kan jämföras med den metod som presenteras av Zhu, Mather och Mishra[8] för att ta fram en lastkurva för snabbbladdning av tunga batterielektriska transportbilar. Det finns en rad likheter av det som presenteras av Zhu m.fl. och det som presenteras i denna rapport, framförallt det att syftet är att utreda effektbehovet, eller lastkurvan, för en given laddinfrastruktur. I båda studierna används stokastiska metoder på verklig data för ankomsttid och fördelning av SOC (i denna studie baserat på avståndsdata). Den största skillnaden mellan de olika metoderna i dessa studier, är att den som presenteras av Zhu m.fl. använder sig av en agent-baserad metod för att simulera lastkurvan, medans denna studie använder en diskret händelsestyrd simuleringsmodell. Dessa två metoder har många likheter, men skiljer sig framförallt genom vilket fokus de tar. Agent-baserad modellering är mer inriktad på att följa de specifika entiteterna i systemet, medans i diskret händelsestyrd modellering så är själva flödet av dessa entiteter mer intressant[36]. De två jämförda modellerna ger liknande resultat, det vill säga effektbehovet under den simulerade tiden, laddtid och kötid (i denna studie endast i scenario 3a och 3b). Det som skiljer sig i resultat är det antagande som görs i denna studie, om att en viss andel av transporter som studeras inte elektrifieras, samt att det i denna studie finns en andel lastbilar som inte laddas. I studien som presenteras av Zhu m.fl. är alla transportfordon batterielektriska och antas ladda om det finns laddare tillgänglig, och köa om det är upptaget. Trots att metoderna skiljer sig något, så bygger de på samma principer och använder samma typer av data och metoder, vilket styrker legitimiteten i denna studie.

Simuleringarna som ställs upp utifrån såväl scenarier som de olika fallen, se sektion 3.2, utförs av den framtagna simuleringsmodellen. För att framställa resultatet som redovisas i sektion 4, samplas modellen 10 gånger. Detta görs då slumpen har en stor inverkan på resultatet, och således behöver fler simuleringar göras för att resultatet ska representera ett medeldygn. Simuleringstiden är ett dygn, med en tidsupplösning på 15 minuter. Detta resulterar således i ett simuleringsresultat som kan jämföras med ett genomsnittligt dygn. Simuleringarna i denna studie tar alltså inte hänsyn till variationer i säsonger eller mellan de olika veckodagarna. Dygnsfördelningen av inkommande transporter kan överlag variera en del, både vad gäller vilken veckodag som studeras och andra variationer som kan påverka aktiviteten på verksamheten. Exempel på dessa variationer är att det på fredagar är allmänt lägre aktivitet, samt att det under högtider också kan tänkas variera. Dessa variationer tas inte i hänsyn i denna studie, vilket kan anses som en svaghet hos denna studie. Vidare, som nämnt, görs ingen skillnad på årstider och säsonger, exempelvis under vissa delar på året då det avverkas mer skog. Däremot kan det argumenteras för att modellen med hjälp av det stokastiska inslaget tar hänsyn till andra typer av variationer, exempelvis väderberoende variationer såväl som trafikförhållanden och dylikt.

Även om modellen har en svaghet i att den inte tar hänsyn till periodiska och säsongsbetonade variationer, kan den tillika anses ha styrkor tack vare hänsynen till andra typer av variationer.

Vad gäller valet av simuleringens tidsupplösning, såväl som samplingsantalet, kan dessa argumenteras för enligt följande: Samplingsantalet valdes till 10 då det ansågs vara tillräckligt stort för att få representativa medelvärdes-resultat, och ändå ge en godtagbar simuleringshastighet. Detta motiveras även i sektion 3.2, där det enligt litteraturen anses vara ett godtagbart antal repetitioner. Däremot finns en risk att slumpgenereringen simuleringarna i vissa fall hamnar *ovanligt* högt eller lågt. Detta kan vara orsaken till att energiförbrukningen hos terminalen ökar så pass mellan scenario 1 och 2, då de borde ligga ungefär i samma storleksordning, se tabellerna 3 och 4. Tidsupplösningen valdes till 15 minuter, efter att ha testats med timvist intervall, och kan motiveras med att laddtiderna för snabbbladdning ofta siktar mot att motsvara den dagliga lunchpausen för lastbilschaufförer, som är 45 minuter. Det ansågs då lämpligt att ha en tidsupplösning som motsvarar en mindre andel av denna tid. Detta val kan verifieras som lämpligt, då resultaten visar att laddtiderna ofta ligger runt 45 minuter (en del upp emot 55 minuter och andra ner emot 20 minuter), se tabellerna 3, 4, 5, 6 och 7.

Simuleringarna valdes att göras över en 24 timmars period, det vill säga ett typiskt dygn. Detta baserat på att det dataset som tagits fram avsåg en längre period, och det var således intressant att studera medelbehovet under denna tid. Det går att argumentera för att simuleringarna borde utförts på längre perioder, då det på bättre sätt skulle gå att studera skarven mellan dygnen. Som modellen fungerar nu så antas inga lastbilar sparas till nästa simulering, och således blir det endast nyligen skapade lastbilar som antas i början av dygnen. Detta visas i samtliga figurer i sektion 4 då varje simulering börjar på noll. Detta anses underskatta effektbehovet i början av dagen, då det i längre simuleringar, exempelvis under 48 timmar, skulle kunna skapas en lastbil klockan 23:30, och således börja ladda då. Detta skulle resultera i att effektbehovet från laddning av denna lastbil spiller över på nästa dag om simuleringstiden skulle vara längre, men i nuläget så klipps denna effekt bort helt och hållet. Detta anses vara en källa till en feluppskattning i början av den studerade tiden. Här gjordes avvägningen att om simuleringen skulle ske på en längre tidsperiod, så skulle det vara svårare att rent visuellt utläsa den dygnsvariation som visas, och som kan vara viktig i analys av elnätspåverkan. Vidare ansågs felet som uppstår i början av simuleringen, vara relativt litet, och förmodligen inte påverka de extremerna som visas under övriga delar av dygnet, och som visat sig vara dimensionerande.

Vidare kan valet av fördelningsfunktioner i modellen motiveras. Först och främst valdes en Rayleigh-fördelning för att avbilda den data som beskriver avstånden, se figurerna 6, 9 och 11. Detta val motiveras med hjälp av det visuella intrycket, som intygar att den avbildande fördelningskurvan någorlunda följer data. Det finns en felmarginal i detta val, men denna har inte kvantifierats eller evaluerats i denna studie. Vidare kan valet av Poissonfördelning, för det stokastiska inslaget i framtagandet av modellens ankommande lastbilar, motiveras. Denna fördelningsfunktion valdes framför en normalfördelning, i samråd med forskare inom ämnet⁴. Detta val gjordes delvis på grund av att Poissonfördelning, till skillnad på normalfördelning, är diskret och passar bättre ihop med den diskreta händelsestyrda simuleringssmodellen som den används tillsammans med. Poissonfördelningen har dessutom fördelen att den inte kan anta ett mindre värde än noll, vilket normalfördelningen kan. Däremot har normalfördelningen fördelen att kunna ändra sin variation (via standardavvikelsen) oberoende av hur stort det förväntade värdet är, vilket inte Poissonfördelningen tillåter.

Målet med modellen som presenteras i denna rapport var att prediktera det effektbehov som

⁴Jesper Rydén, SLU, [2023-05-08], muntlig kommunikation

laddinfrastrukturen kommer ha i ett framtida elektrifierat transportsystem, men givet dagens transportmönster. Det går, som nämnt i sektion 1.4, att tänka sig att en storskalig implementering av batterielektriska fordon i det rådande transportsystemet kommer att medföra nya förutsättningar och nya transportmönster. Det kan, och kommer sannolikt, tillkomma nya strategier för hur skogsråvaran befraktas, exempelvis på grund av att räckvidden för en lastbil blir kortare, lastbilen blir mer väderberoende och möjligheten till laddning begränsad. Vidare kommer detta kunna påverka arbetssättet för de som kör lastbilarna, exempelvis längre raster och väntetider i och med laddning och liknande. Detta kommer såklart påverka transportmönstret, vilket i sin tur påverkar relevansen av det som studeras i denna rapport. Denna studie ska därför inte ses som en definitiv kvantifiering av det framtida effektbehovet, utan snarare som en bild av hur det kommer kunna se ut om inga åtgärder vidtas. Således kan denna studie belysa de faktorer som kan bli kritiska vid en implementering, och till viss mån motivera vissa åtgärder.

5.2 Resultatdiskussion

Resultaten som presenteras i figurerna 13 till 27 visar det simulerade effektbehovet under ett medeldygn. En del som är intressant att studera i dessa figurer är hur medelvärdet är fördelat över dygnet, det vill säga om någon tydlig effekttopp uppenbaras. Dessutom visas det högsta effektvärdet som simuleringen når upp i tack vare det stokastiska inslaget, och således ger en indikation på hur stort det högsta effektbehovet kan komma att bli. Det går utifrån dessa figurer att utläsa hur ofta som denna extrem uppnås under simuleringarna. Om extremen uppnås ofta, kan detta ge en indikation på att det med större sannolikhet kommer behövas den effekt som anges, än om den uppnås någon enstaka gång. Ett exempel på detta visas då resultaten från scenario 1 studeras, se figurerna 13, 14 och 15. I fallstudien för industri 1, figur 13, så uppnås effekten 1,9 MW i någon av simuleringarna under åtminstone 5 tidssteg under de 10 simuleringarna. Detta kan jämföras med de andra fallstudierna i samma scenario, figur 14 och 15, där i respektive fall extremen endast uppnås under ett enstaka tidssteg. Det kan således argumenteras för att hos industri 1 finns det mer underlag för att dimensionera laddinfrastrukturen utefter den uppnådda maxeffekten, än i de andra fallen som den mesta av tiden skulle klara av att tillgodose laddbehovet med en mindre dimensionering av laddinfrastrukturen.

När resultaten studeras är det av intresse att jämföra de olika scenarierna. Här kan scenario 1, som får ses som ett referensfall i denna studie, jämföras med scenario 2, då dessa liknar varandra i antaganden, men där endast laddeffekten per laddare ändras, se sektion 3.2. Överlag finns en skillnad i hur effektbehoven under dagen fluktuerar upp och ner, där scenario 2 varierar snabbare än vad resultaten i scenario 1 gör. Detta förklaras med att effekten är högre per laddare i scenario 2, vilket leder till kortare laddtider, och större fluktuation. Laddtiderna i scenario 2, som visas i tabell 4, beräknas av modellen till ungefär 20 minuter, medans i scenario 1 uppvisar laddtider på drygt 50 minuter, tabell 3. Det som också är intressant i denna jämförelse är hur maxeffekten, energiförbrukningen och antalet laddare, som redovisas i tidigare nämnda tabeller för respektive scenario, förhåller sig till varandra. I scenario 1 uppgår laddeffekterna till 1,9 MW för industri 1, 2,5 MW för industri 2 samt ungefär 3,2 MW för terminalen, och det krävs mellan 6, 8 respektive 10 laddare för att tillgodose denna effekt. Vidare går detta att jämföras med samma resultat i scenario 2, där effekten överlag är högre, ungefär 3,4 för de båda industrierna samt 4,2 MW för terminalen, men där det krävs betydligt färre laddare, 4 respektive 5 stycken. Dessa effekter och antal laddare får här ses som de dimensionerande faktorerna, då detta krävs för att tillgodose just dessa transportsystem.

Dessa dimensionerande effekter som ges som resultat i denna studie, går således att ställas i relation till elnätet. Effekterna som presenteras, som finns någonstans mellan 1,9 till 4,2 MW

för scenario 1 och 2, kan både vara stort eller litet beroende på vad de jämförs med. En anslutning av dessa effekter på en plats där elnätet är svagt, skulle det kunna bli problematiskt med konsekvenser på effektkvaliteten. Särskilt om det är som studien visar att effekten fluktuerar ganska kraftigt. Exempelvis kan en tänka sig en virkes terminal som ligger lite avsidet och som inte har någon stark anslutning till nätet. För att kunna dimensionera för dessa typer av effekter, och även ännu högre om man tänker sig att alla transporter ska elektrifieras, så kan det krävas en del åtgärder i elnätet i närheten. Däremot går det att tänka att för industrierna, som både förbrukar stora mängder el och i många fall också producerar egen el, så är dessa effekter inte så mycket. I och med att industrin har en stor effektförbrukning från nätet, borde elnätet rimligtvis vara relativt starkt i det närliggande området. Således kan en spekulera i att dessa effekter nog inte bör ha så stora konsekvenser på effektkvaliteten.

Om istället resultaten från scenario 3a och b jämförs med referensscenario 1, så finns det tydliga skillnader som går att belysa. Framförallt är denna skillnad kopplat till det som skiljer dessa åt, nämligen begränsandet av antal laddpunkter. Denna skillnad syns tydligast då figurerna 19 till 21 samt 22 till 24, där det visas att maxeffekten uppnås betydligt oftare. Allra tydligast är det för terminalen i scenario 3a, då alla laddare är upptagna från tidigt på morgnen. Detta går att relateras till det resultat som presenteras i tabell 5, där det blir tydligt att väntetiden för lastbilarna till en laddare är mycket högre än för de två industrierna, drygt 3 timmar. Detta är ett tydligt argument för att två laddare är alldeles för lite för att på ett godtagbart sätt tillgodose laddbehovet. Även om kötiden för de båda industrierna är betydligt mindre, 46 respektive 52 minuter, kan denna kötid också anses vara relativt lång. Det bör noteras att i dessa fall är kötiden kombinerat med laddtiden den totala tiden som lastbilen måste vara stilla innan den kan åka vidare. Vidare, om scenario 3b analyseras med avseende på ladd- och kötid, får dessa ses som någorlunda godtagbara för just industrifallen, där kötiden endast är ett fåtal minuter. Däremot verkar kötiden för terminalen fortfarande bli för lång, och bör därför studeras vidare på samma sätt för att hitta ett godtagbart antal laddare.

Till sist kan även scenario 4 analyseras med hjälp av scenario 1 som referens. Scenario 4 får ses som ett första steg i elektrifieringen, där endast de 30 % kortaste transporterna väljs till batterielektriska. Det som förväntas här är således ett överlag lägre effektbehov, vilket också kan bekräftas av resultaten, både vad gäller medeleffekten i figurerna 25 till 27 men även av det som visas i tabell 7. Energiförbrukningen blir i samtliga fall betydligt lägre, likväl som maxeffekterna och antalet laddare. Det som är intressant att notera i tabell 7 är att dessa resultat för industri 1 inte alls minskar lika mycket. Detta beror på att industri 1 är den enda som antar stora andelar terminaltransporter, vilka också tas med i beräkningarna i scenario 4. Detta val gjordes eftersom terminaltransporter i allmänhet anses som en lågt hängande frukt, vid elektrifiering av skogstransporter, eftersom de till skillnad från avläggstransporter ofta är lätta att förutspå och har större möjlighet till laddning i båda ändar av transportsträckan. I detta fall är det möjligt att detta val begränsar möjligheten till jämförelse mellan de olika fallstudierna, men argumentet att det bättre representerar ett framtida möjligt system på denna plats kvarstår. I scenario 4 är det också ytterst intressant att studera elektrifieringsgraderna, i jämförelse med referensscenario 1. För industri 1 minskar andelen elektrifierade transporter endast något, både med avseende på antalet lastbilar och på andelen av transportarbetet som kan elektrifieras. Detta kan förklaras med att det fortfarande finns en stor andel terminaltransporter, som inte påverkas av bytet från scenario 1:s till scenario 4:s antaganden. Däremot går det att utläsa en större skillnad i dessa faktorer när industri 2 samt terminalen studeras. Här går dessa från att kunna elektrifiera ungefär 60 % till ungefär 30 - 40 % med avseende på antalet lastbilar, och från 40 - 50 % till 15 - 20 % med avseende på transportarbetet som kan elektrifieras.

I tabellerna 3, 4, 5 och 6 visar resultat för den grad som, under studiens antaganden, går att elektrifiera, både med avseende på antalet lastbilar såväl som med avseende på transportarbete. Mellan scenario 1, 2, 3a och 3b varierar dessa något, vilket kan förklaras med det stokastiska inslaget i simuleringen. Denna lilla variation är förväntad, och borde vid ett större antal repetitioner av simuleringen konvergera mot samma värde. Som tidigare nämnt skiljer sig scenario 4 i dessa resultat, vilket är förväntat då detta scenario är upplagt som delvis elektrifiering. Vidare går det att analysera medeltransportavståndet för samtliga scenarier, se tabellerna 3, 4, 5, 6 samt 7. Dessa resultat varierar också ytterst lite, när de olika scenarierna jämförs. Dessa påverkas inte av de olika antagandena i scenarierna utan baseras endast på de slumpade avstånden, och således förväntas de variera något. Dessa kan analyseras utifrån den räckvidd som presenteras för en batterielektrisk lastbil, se tabell 1. Medeltransportavstånden för industri 1 verkar vara drygt 175 km, medans för industri 2 och terminalen verkar medeltransportavståndet vara något högre, ungefär runt 200 km. Detta kan jämföras med räckvidden, som är ungefär 228 km. Detta går således att relatera till elektrifieringsgraden, där det är rimligt att konstatera att det finns utmaningar kopplat till räckvidden hos den batterielektriska lastbilen då denna appliceras på dessa skogstransporter.

Som nämnt i sektion 3.2, så visar källa [5] att transportavstånden tenderar att vara längre i norra Sverige än i södra Sverige. Detta motsäger resultaten något, eftersom dessa visar att medeltransportavståndet för industri 2, som ligger i södra Sverige, är längre än för industri 1, som ligger i norra Sverige. Detta kan dock förklaras med terminaltransporternas bidrag. I industri 2 så antas inga terminaltransporter, vilket det för industri 1 gör. Det är rimligt att tänka sig att skogstransportkedjan i norra Sverige är mer uppdelad, med mellanstopp på terminaler, om dessa har längre transportsträckor än i södra Sverige. Ur industriernas perspektiv blir således de upplevda transportavstånden kortare, även om de totala avstånden som skogsråvaran fraktas allt jämt är längre.

Slutligen går det att diskutera vad resultatet som presenteras i denna rapport betyder för de respektive industrierna och terminalerna. Studien har som nämnt tidigare använt stokastiska metoder för att komma fram till ett effektbehov på dessa industrier och terminaler, som ska kunna kopplas till både hur transporter utförs, men också ska kunna sättas i relation till elnätet. Det som går att säga för industrierna att det inte verkar vara allt för höga effekter som kommer krävas, för att försörja åtminstone 60 % av de inkommande transporter. Att investera i 6 eller 8 laddare kan ses som en stor investering, men får ses som en nödvändighet i sammanhanget. Just för industrierna så finns det många faktorer som ses som positiva vad gäller elektrifiering i stort. Exempelvis, om terminaltransporter är frekventa körsträckor till industrin verkar det finnas stora möjligheter, då de har en fördel i att de är prediktiva och går att laddas på båda ändar av transporten. Vidare verkar de dimensionerande effekterna vara relativt höga i vissa fall, men borde inte vara något problem relativt industriernas vardagliga förbrukning. Det som allmänt bör tas med från denna studie är att det inte har tagits hänsyn till effekten av att omplanera rutten och transportmönster, för att minska den krävda dimensioneringen. Detta kommer bli viktigt, både för att minska den installerade effekten hos laddinfrastrukturen, men också för att få så högt utnyttjande av denna installerade och abonnerade effekt.

Vad gäller terminalerna, så verkar det allmänt som effektbehovet blir genomgående högre, möjligtvis på grund av att intransporterna i snitt är längre på denna terminal än för industrierna. Om en terminal vill etablera laddinfrastruktur behöver de tänka på att tidigt involvera elnätsägaren för att ledtider och kostnader för anslutning inte blir allt för höga. En rekommendation är att använda denna typ av analys för att dimensionera anslutningen på rätt sätt.

6 Slutsats

Studien som presenteras i denna rapport använder sig av en diskret händelsestyrd simuleringsmodell för att beräkna effektbehovet, samt ett antal andra parametrar, på specifika platser inom skogsnäringens transportkedja som anses bli viktiga knytpunkter för etablering av laddinfrastruktur. De platser som har studerats är två massaindustrier, en i norra och en i södra Sverige, samt en terminal i norra Sverige.

Effektbehovet på dessa platser kan utifrån simuleringar presenteras. Utifrån grundscenariot, där dagens teknik för laddinfrastruktur appliceras på så många transporter som är tekniskt möjliga att elektrifiera, så kan effektbehovet konstateras vara som högst 1,9 MW och 2,5 MW för industri 1 respektive 2, samt 3,2 MW för terminalen. Vidare, om istället laddning med MCS (Megawatt Charging System) antas, så blir de högsta effektbehoven 3,4 MW för de båda industrierna och 4,2 MW för terminalen.

I allmänhet går det att analysera hur effektbehovet förväntas variera under ett typisk dygn. Det är av intresse att studera tidsintervall då effektbehovet antar toppar, då extra mycket effekt efterfrågas av elnätet. Det går utifrån studien att konstatera att i åtminstone en tredjedel av de simulerade fallen så visas en tydlig effekttopp under morgonen eller på förmiddagen. I de resterande fallen är effektbehovet mer eller mindre jämt utspritt över dygnet, från morgonen och framåt. Detta är av intresse när studier görs på övriga konsumenters effektbehov, och hur dessa tillsammans påverkar elnätet.

I dimensioneringen av antalet laddare, går det att konstatera att i många fall krävs relativt många laddare. I grundscenariot krävs 6 och 8 laddare för respektive industri, och 10 stycken för terminalen. Däremot visar studien att det med planering av transporter under vissa tider på dygnet, finns potential att minska detta antal utan en stor påverkan på inflödet. Detta behöver dock studeras vidare. Däremot går det att konstatera att om en storskalig etablering av laddinfrastruktur för detta system, så krävs fler än 2 laddare. Vid begränsandet av laddare visade sig 2 laddare vara för lite i samtliga fall, då kötiderna till en ledig laddare blev för långa. Vidare visade sig 3 laddare i vissa fall fungera, då kötiden minskade till ett fåtal minuter, men i terminalens fall behövs ännu fler laddare.

Enligt studien visas att om laddinfrastruktur etableras på depåer samt industrier och terminaler, så kan över 60 % av dagens transportflotta elektrifieras, utan några åtgärder i transportmönster och ruttplanering. Vidare visas denna siffra i industri 1:s fall vara över 75 %, då denna antar ett stort antal terminaltransporter. Det visar sig också av studien att detta motsvarar runt 50 % av transportarbetet, som utan åtgärder går att elektrifiera.

6.1 Att studera vidare

Denna studie bortser från påverkan av planering och optimering av transportsystemet för att minska effektbehovet och det dimensionerande antalet laddare. Denna studie avser endast utreda hur effektbehovet blir om ingen av de nämnda åtgärderna genomförs, och ger således en överdriven bild av de dimensionerande faktorerna. Fler studier och praktiska exempel behövs för att utreda hur effektbehovet kommer att se ut om åtgärder vad gäller planering och optimering införs. Detta anses således som en studie som motiverar vidare studier att undersöka behovet av planering och optimering av transportsystemet.

Referenser

- [1] Naturvårdsverket, "Sveriges klimatmål och klimatpolitiska ramverk," u.å.
- [2] K. Holmgren, J. Takman, I. Viertht, S. Heyne, M. Ekström, M. Fröberg, M. Johansson, P.-A. Karlsson, and O. Petré, "Fossilfri framdrift för tunga långväga transporter på väg – Kostnadsfördelning och risker för olika aktörer", 2021. KNOGA. Rapport nr FDOS 12:2021.
- [3] Naturvårdsverket, "Fördjupad analys av den svenska klimatomställningen 2020", 2020. RAPPORT 6945.
- [4] E. Näsström and B. Hasselgren, "Elektrifiering av tunga vägtransporter - affärsmodeller fas 5," 2021. 2021:094, ISBN: 978-91-7725-855-1.
- [5] A. Davidsson, O. Gustavsson, and T. Parklund, "Skogsbrukets vägtransporter 2020," 2023. SKOGFORSK 1142-2023.
- [6] O. Olsson, J. Gong, M. Xylia, B. Nykvist, G. Andersson, and O. Gustavsson, "Accelererad omställning till fossilfria transporter i skogssektorn," 2021. TrippleF: 2019.2.2.21.
- [7] IEA, "Net Zero by 2050- A Roadmap for the Global Energy Sector," 2021. IEA, Paris.
- [8] X. Zhu, B. Mather, and P. Mishra, "Grid Impact Analysis of Heavy-Duty Electric Vehicle Charging Stations," in *2020 IEEE Power Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, pp. 1–5, 2020. doi:10.1109/ISGT45199.2020.9087651.
- [9] B. Borlaug, M. Muratori, M. Gilleran, D. Woody, W. Muston, T. Canada, A. Ingram, H. Gresham, and C. McQueen, "Heavy-duty truck electrification and the impacts of depot charging on electricity distribution systems," vol. 6, no. 6, pp. 673–682. doi:10.1038/s41560-021-00855-0.
- [10] J. Bi, Y. Wang, S. Sun, and W. Guan, "Predicting Charging Time of Battery Electric Vehicles Based on Regression and Time-Series Methods: A Case Study of Beijing," vol. 11, no. 5, p. 1040. doi:10.3390/en11051040.
- [11] S. G. Mitrakoudis and M. C. Alexiadis, "Modelling Electric Vehicle Charge Demand: Implementation for the Greek Power System," vol. 13, no. 7, p. 115. doi:10.3390/wevj13070115.
- [12] T. Gnann, S. Funke, N. Jakobsson, P. Plötz, F. Sprei, and A. Bennehag, "Fast charging infrastructure for electric vehicles: Today's situation and future needs," vol. 62, pp. 314–329. doi:https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.03.004.
- [13] H. Tu, H. Feng, S. Srdic, and S. Lukic, "Extreme Fast Charging of Electric Vehicles: A Technology Overview," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 5, no. 4, pp. 861–878, 2019. doi:10.1109/TTE.2019.2958709.
- [14] V. T. Tran, D. Sutanto, and K. M. Muttaqi, "The state of the art of battery charging infrastructure for electrical vehicles: Topologies, power control strategies, and future trend," in *2017 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, pp. 1–6, 2017. doi:10.1109/AUPEC.2017.8282421.
- [15] Y. Cao, S. Tang, C. Li, P. Zhang, Y. Tan, Z. Zhang, and J. Li, "An Optimized EV Charging Model Considering TOU Price and SOC Curve," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, no. 1, pp. 388–393, 2012. doi:10.1109/TSG.2011.2159630.

- [16] K. Clement-Nyns, E. Haesen, and J. Driesen, “The Impact of Charging Plug-In Hybrid Electric Vehicles on a Residential Distribution Grid,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, no. 1, pp. 371–380, 2010. doi:10.1109/TPWRS.2009.2036481.
- [17] S. Rahman, I. A. Khan, and M. H. Amini, “A Review on Impact Analysis of Electric Vehicle Charging on Power Distribution Systems,” pp. 420–425, 2020. doi:10.1109/SPIES48661.2020.9243118.
- [18] B. Nykvist and O. Olsson, “The feasibility of heavy battery electric trucks,” vol. 5, no. 4, pp. 901–913. doi:10.1016/j.joule.2021.03.007.
- [19] Skogforsk, “Projekt: Accelerera elektrifieringen av skogsbrukets transporter,” 2023. url: <https://www.skogforsk.se/kunskap/projekt/accelerera-elektrifieringen-av-skogsbrukets-transporter/>.
- [20] H. von Hofsten, “Skogsbrukets transport- och arbetsfordon,” 2019. SKOGFORSK 1003-2019.
- [21] Closer, “REEL- Tillsammans elektrifierar vi Sveriges lastbilstransporter!,” u.å. url: <https://closer.lindholmen.se/projekt/reel>.
- [22] SCA, “Världspremiär för SCAs eltimmerbil i skogen,” 2023. url: <https://www.sca.com/sv/media/nyheter/2023/varldspremiar-for-scas-eltimmerbil-i-skogen/>.
- [23] Scania, “Batteridrivna ellastbil,” 2023. url: <https://www.scania.com/se/sv/home/products/trucks/battery-electric-truck.html>.
- [24] J. Rogstadius, *Interaktionseffekter mellan batterielektriska lastbilar, elvägar och statisk laddinfrastruktur: Resultat från högupplöst simulering av godstransporter på det svenska vägnätet under perioden 2020–2050*. RISE Rapport, 2022. The author can provide translations of this report into other languages on request.
- [25] E. Månsson, *Inventering av laddbehov för elektrifierade logistikcentrum*. PhD thesis, 2022.
- [26] Power Circle, “Elektrifiering och laddning av tunga transporter,”.
- [27] M. R. Bernard, A. Tankou, H. Cui, and P.-L. Ragon, “Charging solutions for Battery-electric trucks,” 2022. International Council on Clean Transportation, Washington, DC, USA.
- [28] S. B S, S. Hampannavar, D. B, and B. Bairwa, “Applications of Battery Management System (BMS) in Sustainable Transportation: A Comprehensive Approach from Battery Modeling to Battery Integration to the Power Grid,” vol. 13, no. 5. doi:10.3390/wevj13050080.
- [29] J. Finnerty, “What is an electric car charging curve?,” 2023. url: <https://www.gridserve.com/2023/02/17/what-is-an-electric-car-charging-curve/>.
- [30] Svenska kraftnät, “Systemutvecklingsplan 2020–2029,” 2019. Sundbyberg: Svenska kraftnät.
- [31] J. Lundquist, *On harmonic distortion in power systems*. PhD thesis, Chalmers University of technology, 2001.
- [32] M. H. J. Bollen, “What is power quality?,” vol. 66, no. 1, pp. 5–14. doi:[https://doi.org/10.1016/S0378-7796\(03\)00067-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7796(03)00067-1).

- [33] Energimarknadsinspektionen, “Ny som koncessionsinnehavare,” 2020. url: <https://ei.se/bransch/koncessioner/natkoncession-for-linje/ny-som-koncessionsinnehavare>.
- [34] J. Rydén, *Stokastik för ingenjörer*. Studentlitteratur, 2., utök. uppl. ed. Publication Title: Stokastik för ingenjörer.
- [35] B. University, “BU-402: What Is C-rate?,” 2021. url: <https://batteryuniversity.com/article/bu-402-what-is-c-rate>.
- [36] M. A. Majid, U. Aickelin, and P.-O. Siebers, “Comparing Simulation Output Accuracy of Discrete Event and Agent Based Models: A Quantitive Approach,” 2010.

Publicering och arkivering

Godkända självständiga arbeten (examensarbeten) vid SLU publiceras elektroniskt. Som student äger du upphovsrätten till ditt arbete och behöver godkänna publiceringen. Om du kryssar i **JA**, så kommer fulltexten (pdf-filen) och metadata bli synliga och sökbara på internet. Om du kryssar i **NEJ**, kommer endast metadata och sammanfattning bli synliga och sökbara. Även om du inte publicerar fulltexten kommer den arkiveras digitalt. Om fler än en person har skrivit arbetet gäller krysset för samtliga författare. Läs om SLU:s publiceringsavtal [här](#):

- <https://www.slu.se/site/bibliotek/publicera-och-analysera/registrera-och-publicera/avtal-for-publicering/>.

JA, jag/vi ger härmed min/vår tillåtelse till att föreliggande arbete publiceras enligt SLU:s avtal om överlåtelse av rätt att publicera verk.

NEJ, jag/vi ger inte min/vår tillåtelse att publicera fulltexten av föreliggande arbete. Arbetet laddas dock upp för arkivering och metadata och sammanfattning blir synliga och sökbara.