CHALMERS
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Tillgänglighet och pris för snabbladdning av elektriska personbilar

DIANA DEYLAMI, ESKIL JONASSON, NICKIE KEYHANFAR, LECH KULA, OLLE LINDBOM, ALGOT LÜNING

Kandidatarbete inom Elkraftteknik — EENX16

INSTITUTIONEN FÖR ELEKTROTEKNIK E2

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2024
www.chalmers.se

KANDIDATARBETE 2024

Tillgänglighet och pris för snabbladdning av elektriska personbilar

DIANA DEYLAMI, ESKIL JONASSON, NICKIE KEYHANFAR,
LECH KULA, OLLE LINDBOM, ALGOT LÜNING

CHALMERS
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Institutionen för Elektroteknik E2
Chalmers Tekniska Högskola
Göteborg, Sverige 2024

Tillgänglighet och pris för
snabbladdning av elektriska personbilar

DIANA DEYLAMI, ESKIL JONASSON, NICKIE KEYHANFAR,
LECH KULA, OLLE LINDBOM, ALGOT LÜNING 2024.

Handledare: ANDERS GRAUERS, Institutionen för Elektroteknik E2
Examinator: JIMMY EHNBERG, Institutionen för Elektroteknik E2

Kandidatarbete 2024
Institutionen för Elektroteknik E2
Chalmers Tekniska Högskola
SE-412 96 Göteborg
Sverige
Telefon +46 31 772 1000

Omslag: Snabbladdare vid ICA Kvantum Frölunda, bild tagen av Eskil Jonasson.

Göteborg, Sverige 2024

Tillgänglighet och pris för
snabbladdning av elektriska personbilar
DIANA DEYLAMI, ESKIL JONASSON, NICKIE KEYHANFAR,
LECH KULA, OLLE LINDBOM, ALGOT LÜNING
Institutionen för Elektroteknik E2
Chalmers Tekniska Högskola

Abstract

This thesis addresses the increasingly critical issue of the availability and pricing of fast charging stations for electric vehicles. With the rise in electric vehicle usage, the demand for efficient and rapid charging solutions has become paramount. The study utilizes agent-based modeling techniques to simulate the behavior of electric vehicle charging systems under varying conditions of supply and demand.

The aim is to provide a nuanced understanding of how different variables such as queuing times, station availability, charging speed, and pricing strategies impact user experience and profits. The simulation models queue formation and waiting times at fast charging stations, offering insights into potential bottlenecks.

The research also evaluates the economic viability of various charging infrastructures and explores the balance between charging costs and accessibility. It is worth noting that this thesis only considers one type of electric vehicle and assumes a static electricity price.

Key findings indicate that future electric vehicle drivers will have access to fast chargers with prices reflecting current levels. An increased number of chargers exponentially reduces waiting times and decreases the variability of waiting times. A linear increase in the number of chargers is necessary to meet the growing demand.

Market research indicated that many drivers prioritize charging speed over lower prices. In comparison, fast-chargers with maximum 250 kW power economically outperform 150 kW fast-chargers, therefore 250 kW chargers are preferred on highways with consistent traffic. Besides, lowering prices during periods of low demand increase profits.

Keywords: electric vehicles, fast charging, agent-based modeling, availability, queue time, congestion, electric power, pricing strategies, charging infrastructure, electrical engineering

Förord

Följande rapport är ett kandidatarbete på Chalmers tekniska högskola i Göteborg. Arbetet är skrivet av Diana Deylami, Eskil Jonasson, Nickie Keyhanfar, Lech Kula, Olle Lindbom och Algot Lüning under våren 2024. Vi vill rikta ett stort tack till vår handledare Anders Grauers för idéer och hjälpande diskussioner under arbetet samt stöd under rapportskrivandet. Vi vill även tacka Axel Ramhult på NIMA energy AB för en givande diskussion.

Nomenklatur

Nedan följer den nomenklatur som använts i detta arbete.

Begrepp	**Förklaring**
Snabbladdare, laddare	En laddare med effekt överstigande 50 kW
AC-laddare	En laddare som laddar med växelström och effekt under 50 kW
Snabbladdningsstation, station	En station med snabbladdare
Laddningstillstånd, SOC	Aktuell laddningsnivå hos ett batteri angiven som procent
Kötid	Tid som elbil får vänta i kö innan den den kan börja ladda
Laddningstid	Tid som elbilen laddar
Betjäningstid	Summan av kötid och laddningstid, total tid i systemet

Innehåll

Förord i

Nomenklatur ii

Figurer v

Tabeller vii

1 Introduktion 1
- 1.1 Bakgrund . . . 1
- 1.2 Syfte och frågeställning . . . 2
- 1.3 Avgränsningar . . . 2

2 Teori 4
- 2.1 Snabbladdning . . . 4
  - 2.1.1 Elnät till laddstation . . . 4
  - 2.1.2 Laddstation till bil . . . 5
  - 2.1.3 Batteriparametrar . . . 6
  - 2.1.4 Laddningskurvor . . . 6
- 2.2 Ekonomiska teorier . . . 7
- 2.3 Ingångskostnader . . . 8
- 2.4 Agentbaserade modell . . . 9
- 2.5 Nyttofunktioner . . . 9

3 Modell för snabbladdningsstationer längs en motorväg 11
- 3.1 Flöde av bilar under en dag . . . 11
- 3.2 Beslutsmodell för laddning av elbilar . . . 12
- 3.3 Beräkning av betjäningstid . . . 13

4 Metod 16
- 4.1 Simuleringsprogram byggt på modell för snabbladdningsstationer . . . 16
  - 4.1.1 Datainsamling . . . 16
    - 4.1.1.1 Total kostnad per dygn för en snabbladdningsstation 18
    - 4.1.1.2 Marknadsundersökning . . . 18
- 4.2 Undersökning av antal snabbladdare för att mätta efterfrågan . . . 20
- 4.3 Undersökning av preferens mellan laddare med effekten 150 kW eller 250 kW . . . 20

4.4 Undersökning av vinst vid rörligt eller fast pris för en snabbladdningsstation 21

5 Resultat **23**
5.1 Simuleringsresultat för mättande av efterfrågan 23
5.1.1 Mättande av efterfråga med 250 kW-laddare 23
5.1.2 Mättande av efterfråga med 150 kW-laddare 26
5.2 Simuleringsresultat för val av 150 kW- eller 250 kW-laddare 28
5.3 Simuleringsresultat för beslut gällande fast eller rörligt pris 30

6 Diskussion **31**
6.1 Marknadsundersökning och elbilförares preferenser 31
6.2 Mätta efterfrågan 32
6.3 Ska en station bygga 150 kW-laddare eller 250 kW-laddare? 34
6.4 Varierande pris beroende på efterfrågan 36
6.5 Samhälleliga och etiska aspekter 36

7 Slutsats **38**

Litteratur **39**

A Appendix A **I**

Figurer

2.1 AC-laddare vid ett hushåll. Bild tagen av Eskil Jonasson. 5
2.2 Exempel på laddningskurva med en toppeffekt på 250 kW kring 9 % — 15 % SOC. I resterande laddningstillstånd varierar effekten mycket. 7

3.1 Fördelning av bilar under varje dygn samt under en timme. Fördelning sedd på hela dagen är normalfördelad medan fördelningen för en given timme är uniform. 12
3.2 Tre respektive fyra bilar i behov av laddning, där två av bilarna redan är under laddning. 14
3.3 Laddningskurvor när elbilen laddas av laddare med maxeffekt 250 kW respektive maxeffekt 150 kW. 15

4.1 Karta över en del av väg E6/E20 med avsnitt 5140103 markerat i rött. Taget från [45], karta framtagen av Lantmäteriet och Trafikverket. 17
4.2 Resultat av marknadsundersökning för fråga 2. Skalan 1-10 motsvarar Lågt pris/Lång laddningstid — Högt pris/Kort laddningstid. Respondenter som svarat ”Nej” på frågan om de har elbil har filtrerats bort. 19
4.3 Variation av pris under ett dygn med antal bilar per timme bakom priskurvan. Notera att de vertikala axlarna har olika enhet och värden. 22

5.1 Visar en korrelation mellan antalet snabbladdare med effekt 250 kW och vad de resulterar i för maximal kötid. Efter 20 snabbladdare är medelvärdet av den maximala kötiden under 1 min. Modellen kördes för 1000 elbilar per dygn. 24
5.2 Illustrerar sambandet mellan antalet bilar på vägen och antalet laddare som krävs för att bevara den maximala kötiden under 10 minuter. 25
5.3 Lådagram över kötid för 19 respektive 20 snabbladdare med effekten 250 kW och 1000 elbilar. Figuren visar spridningen av maximal kötid under 365 dygn simulerade av modellen. Undre kvartilen, medianen och övre kvartilen är markerade med vertikala streck. Cirklarna efter den övre kvartilen är värden som avviker med 1,5 kvartilavstånd. . . 25
5.4 Visar en korrelation mellan antalet laddare med effekten 150 kW och vad de resulterar i för maximal kötid. Efter 24 laddare är kötiden under 1 min. Modellen kördes för 1000 elbilar per dygn. Notera att den horisontella axeln börjar vid 13 laddare istället för 11 som i figur 5.1. 26

5.5 Illustrerar sambandet mellan antalet elbilar på motorvägen per dygn och antalet laddare som krävs för att hålla den maximala kötiden under 10,90 min. Laddarna har effekten 150 kW. 27
5.6 Lådagram över kötid för 21 respektive 22 snabbladdare med effekten 150 kW och 1000 elbilar. Figuren visar spridningen av maximal kötid under 365 dygn simulerade av modellen. Undre kvartilen, medianen och övre kvartilen är markerade med vertikala streck. Cirklarna efter den övre kvartilen är värden som avviker med 1,5 kvartilavstånd. . . 27
5.7 Visar medelvinst per dag för en station med 250 kW-laddare respektive en station med 150 kW-laddare. 29
5.8 Vinst per dag utifrån tre fall där rörligt pris har varierats enligt tabell 5.3. 30

Tabeller

3.1 Parametrar för elbil 11

4.1 Programbibliotek och versioner 16
4.2 Årsdygnsmedeltrafik på väg E6/E20 för lätta fordon i båda riktningarna. 17
4.3 Priser för en snabbladdningsstation med 20 snabbladdare längs väg E6/E20. 17
4.4 Satta beslutsparametrar utifrån marknadsundersökningen. 19
4.5 Prissättning i de undersökta fallen. Alla priser är exklusive moms. . . 22

5.1 Investeringskostnad och motsvarande antal 150 kW samt 250 kW laddare. 28
5.2 Summan av vinsterna för stationerna beroende på totalt antal snabbladdare längs motorvägen 29
5.3 Prissättning i de undersökta fallen. Alla priser är exklusive moms. . . 30

A.1 Laddningstid för laddare med maxeffekt 150 kW från 0 % till SOC . . I
A.2 Laddningstid för laddare med maxeffekt 250 kW från 0 % till SOC . . IV

1
Introduktion

Efterfrågan på elbilar har ökat markant de senaste åren [1]. Trots att inköpspriset är högt finns det idag många elbilar som är i trafik i Sverige. Ett välfungerande nätverk med snabbladdningsstationer är nödvändigt för att göra långa körsträckor möjliga. Snabbladdningsstationerna behöver inte bara säkerställa tillräckligt höga laddningshastigheter utan också erbjuda konkurrenskraftiga laddningspriser.

Potentiella köpare och befintliga användare av elbilar ställs inför viktiga frågor kring framtidens kötider och laddningspriser, eftersom detta påverkar hur praktiskt det blir att använda elbilar för längre resor. Idag finns det inget tydligt svar på dessa frågor, vilket kan ge upphov till oro [2] för att laddning kan bli ett potentiellt problem i framtiden då antalet elbilar successivt ökar. Att underlätta för elbilar som transportmedel är viktigt för hela samhället. Internationella energirådet prognostiserar att utsläppen från personbilar kan hamna under 0,5 $GtCO_2$ år 2050, jämfört med år 2022 då utsläppen var 3,7 $GtCO_2$, om förbränningsmotorer ersätts med bland annat elbilar [3]. Elbilar är således en viktig del i omställningen i syfte att nå nettonollutsläpp.

En analys av antalet snabbladdare längs en motorväg kan bidra till att påskynda och underlätta försäljningen av elbilar genom att identifiera och hantera eventuella hinder för laddning. Analysen kan även visa huruvida det är lönsamt att installera snabbladdningsstationer, detta för att göra övergången så kostnadseffektiv och enkel som möjligt. Det är genom dessa analyser som en mer gynnsam miljö för användare av elbilar kan skapas och därmed stödja övergången till en mer hållbar framtid.

1.1 Bakgrund

I tidigare forskning [4] har undersökningar gjorts i syfte att bestämma antalet snabbladdare som behövs för att mätta efterfrågan. Där framtogs en diskret händelsebaserad modell som simulerade snabbladdare längs en motorväg i Tyskland. Diskreta händelsebaserade modeller har många likheter till agentbaserade modeller och i [5] jämfördes en ren diskret händelsebaserad modell med en blandad diskret händelsebaserad modell och agentbaserad modell. I jämförelsen visades att den blandade agentbaserad modellen var fördelaktig för simulering av köbildning vid en reception. I ytterligare forskning [6] [7], har agentbaserade modeller även visat sig vara särskilt effektiva för att analysera utvecklingen inom marknaden för elbilar samt deras behov

av infrastruktur. I [6] utforskades hur dessa modeller kan användas för att förutsäga förändringar i efterfrågan och behovet av laddningsstationer för elbilar, vilket belyser vikten av att förstå konsumentbeteenden och systeminteraktioner. Konsumentbeteendet är centralt för att förstå acceptansen av elbilar, eftersom personbil utgör det vanligaste val av transportmedel. Det påverkar direkt hur öppna människor är mot att välja eldrivna alternativ. I [7] granskades framtida scenarier för utbyggnaden av laddningsinfrastruktur för långdistanstransporter i Sverige, vilket är avgörande för att stödja den ökande användningen av elbilar. Forskningen visade på betydelsen av att analysera och planera infrastruktur med noggrannhet för att undvika över- eller underdimensionering. Dessa studier understryker att modelleringsverktyg, såsom agentbaserade modeller, är essentiella för att kunna göra välgrundade förutsägelser om framtida behov och optimering av snabbladdningsinfrastruktur. Genom att fortsätta bygga på dessa insikter kan detta kandidatarbete bidra till den växande kunskapsbasen kring hur effektivt och hållbart snabbladdningsinfrastruktur för elbilar kan utvecklas, vilket är ytterst aktuellt i dagens samhälle.

1.2 Syfte och frågeställning

Projektet avser att utveckla en agentbaserad modell för att undersöka hur faktorer som kötid, tillgänglighet och prissättningar påverkas av effekt och antal snabbladdare i en snabbladdningsstation. Syftet är att få en inblick i konsumenternas användning av snabbladdare för att bedöma behovet av utökning eller nybyggnation av laddinfrastruktur. Specifikt kommer tre frågeställningar undersökas:

- Hur många laddare måste finnas längs en väg för att mätta efterfrågan?
- Ska en station bygga 150 kW-laddare eller 250 kW-laddare ur vinstdrivande syfte?
- Ska en station satsa på att ha ett varierande pris beroende på efterfrågan?

Genom att besvara ovan frågeställningar hoppas insikter nås kring tillgänglighet av snabbladdare samt hur laddning med dem kommer prissättas. Vidare kommer det vara möjligt att se potentiella vinster vid drivande av en snabbladdningsstation. Att undersöka lönsamheten borde kunna användas för att se om utbyggnaden av snabbladdning kan ske genom investeringar från privata sektorn, eller om den kommer kräva subventioner.

1.3 Avgränsningar

Inom ramen för projektet kommer endast personbilar att inkluderas, då de utgör den största delen av fordon på vägarna. Antalet elbilar kommer tas från den nuvarande andelen elbilar i Sverige.

Projektet kommer att inriktas på en sträcka som karakteriseras av antal elbilar samt antal laddningsstationer. Laddningsstationerna är placerade bredvid varandra. I modellen kommer det vara omöjligt för bilarna att välja någon annan station än stationerna längs vägen. Denna avgränsning är avsedd att undvika beräkningskomplexitet i att bestämma den kortaste vägen mellan två punkter i ett vägnätverk [8].

Modellen förutsätter att elen köps in av operatören till ett konstant elpris. Strategier kring inköp av el är annars ett intressant forskningsområde för sig självt. Antalet elbilar bestäms utifrån den andel personbilar registrerade som elbilar i Sverige år 2023 samt medeldygnsflödet för väg E6/E20 mellan Halmstad och Göteborg.

Elbilar i modellen kommer karakteriseras av ett begränsat antal parametrar, till skillnad från riktiga bilar som har många fler. Genom att abstrahera detaljer kring olika bilar kommer slutsatser lättare dras kring hur olika prissättningsmekanismer samt beslutsmekanismer påverkar systemet.

2
Teori

I detta kapitel behandlas teoretiska grunder för snabbladdning, ekonomiska modeller samt agentbaserad modellering. Kapitlet presenterar centrala koncept och metoder som är fundamentala för att förstå de underliggande processerna i rapporten, såsom ladddningskurvor, ingångskostnader och nyttofunktioner.

2.1 Snabbladdning

Det finns olika definitioner för vad snabbladdning innebär [9], enligt [10] kan snabbladdare ses som varje laddare med en effekt som överstiger 50 kW. I Sverige finns i nuläget över 3000 publika laddare med snabbladdning [11], definierad som effekt över 22 kW. Längs väg E6/E20 finns över 130 snabbladdare med en effekt på 150 kW eller mer [12]. Trots detta är osäkerhet kring tillgänglighet av laddning en av de största orosmolnen för potentiella ägare av elbilar [13]. Följande avsnitt beskriver hela processen för snabbladdning från elnät till laddstation och sedan laddstation till bil.

2.1.1 Elnät till laddstation

Enligt Svenska Kraftnät [14] består elnätets struktur inom Sverige av tre nivåer; transmissionsnätet, regionalnätet och lokalnätet. Vidare beskrivs att nätverken fungerar som vägar och överför elektricitet från producenten till konsumenten. Det första nätverket, transmissionsnätet, fungerar enligt Svenska Kraftnät som "motorvägar" för att transportera stora kvantiteter elektricitet från stora kraftverk till regionalnätet. Det sträcker sig från norr till söder genom hela landet och knyter samman Sveriges elnät med andra länders elnät. Det statligt ägda transmissionsnätet använder höga spänningar, 400 kV eller 220 kV, för att minimera energiförlusterna, vilket möjliggör att stora elanvändare kan ansluta sig direkt till transmissionsnätet [14]. Den andra nivån, regionalnätet, beskriver Svenska kraftnät som "landsvägar" genom att de transporterar elen från transmissionsnätet till lokalnätet. Regionalnätets spänning är på 130 kV på grund av att elen inte behöver överföras lika långt som transmissionsnätet. Vanligtvis är det stora elanvändarna och medelstora elproducenter som är direkt anslutna till regionalnätet. Dessutom är det större elnätsföretag som äger regionalnätet [14]. Den tredje nivån är lokalnätet som Svenska kraftnät anser fungerar som småvägar fram till hushållet eller företaget. Inom lokalnätet kan även mycket små elproducenter kopplas upp, till exempel de som säljer överskott av sin egenproducerade el. Lokalnätet är ett avgränsande nät med en spänning på

40 kV eller lägre. När elen förs till hushållet sker en spänningsminskning till 230 V. Lokalnäten ägs av många olika elnätsföretag [14].

Beroende på hur hög spänningskonsumtion laddstationen kommer ha kan man justera den efter tillgängligheten för olika elnät. Om det inte skulle finnas något elnät i det området måste en nyanslutning upprättas. Enligt [15] råd kan en nyanslutning för ett hus till elnätet som har 0-200 meter till närmaste nätstation kosta upp mot 40 000 kr.

Anslutning av laddstationen kräver en noggrann beräkning av behovet, vilket minimerar onödiga utgifter. [16]. Därefter installeras en elanläggning för att distribuera elen samt ev. transformatorstationer och spänningsinfrastruktur, beroende på behovet [16].

2.1.2 Laddstation till bil

Strömmen som elnätet tillför laddstationerna är växelström, AC. Dock är det likström, DC, som laddar elbilens batteri [17]. Laddhastigheten beror på om bilen matas med AC eller DC. Matas bilen med AC är det bilens likriktare som omvandlar AC till DC innan den överförs till bilbatteriet. Däremot har bilens likriktare en maximal kapacitet AC den kan ta emot som kan variera på bilmodell. En AC-laddare visas i figur 2.1.

Figur 2.1: AC-laddare vid ett hushåll. Bild tagen av Eskil Jonasson.

Snabbladdare, eller DC-laddare är utrustade med en kraftfull inbyggd likriktare som effektivt omvandlar växelström, AC, till likström, DC [18]. Detta resulterar i en betydligt snabbare laddning av elbilens batteri jämfört med att använda den inbyggda ombordladdaren i bilen, eftersom DC har en mycket högre laddström än den omvandlade AC till DC-strömmen som genereras av ombordladdaren. Anledningen till den snabbare laddningen är att batteriet direkt tillförs ström, i form av likström, från

snabbladdaren. Denna ström kan sedan lagras direkt i batteriet, vilket effektiviserar laddningsprocessen.

2.1.3 Batteriparametrar

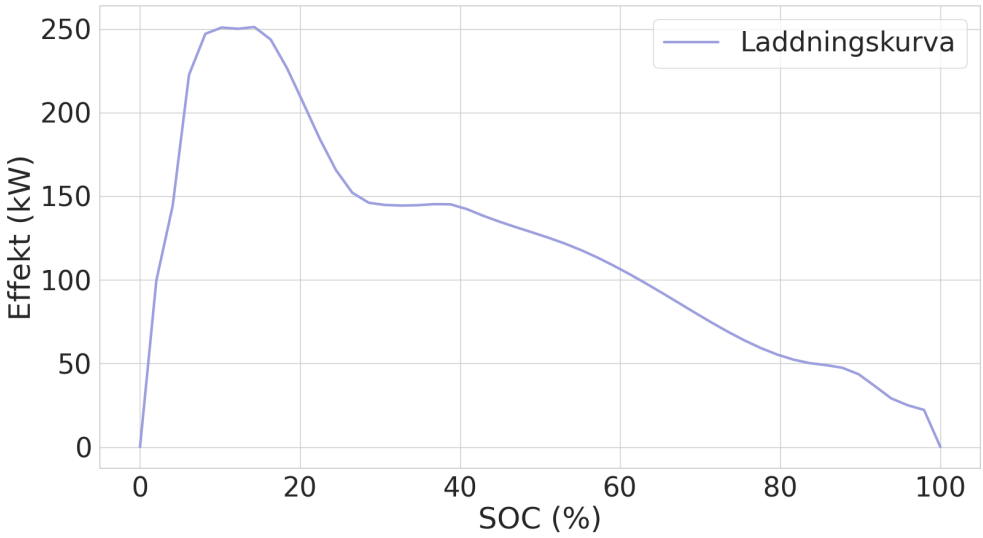
Litiumjonbatterier har blivit det dominerande valet i dagens elbilar, tack vare deras höga energitäthet och förmåga att hantera många laddningscykler [19]. Batteriernas vikt, storlek och energikapacitet är avgörande då de säkerställer elbilarnas räckvidd.

Det är viktigt att undvika extrema laddningstillstånd för att maximera batteriernas livslängd och prestanda. Laddningstillståndet (SOC), som mäter den aktuella laddningsnivån i förhållande till batteriets totala kapacitet, är en viktig faktor att övervaka [20]. Fulla laddningar och fullständiga urladdningar kan påskynda nedbrytningen av batteriets kemiska material. Därför rekommenderar många biltillverkare att hålla SOC inom intervallet 20 % — 80 % [21] [22] [23].

En annan viktig aspekt för att säkerställa batteriets långsiktiga hälsa är hanteringen av värmeutveckling under snabbladdning [24]. Dagens elbilar är utrustade med temperaturregleringssystem som är designade att hantera den höga effekten från snabbladdning [25]. Dessa system skyddar batteriet mot överhettning och arbetar för att hålla temperaturen inom ett optimalt intervall. Genom att integrera sådana tekniska lösningar kan elbilstillverkarna erbjuda fordon som inte bara möter dagens behov av snabb och effektiv laddning utan också förbättrar batteriernas hållbarhet över tid.

2.1.4 Laddningskurvor

Laddningskurvan för ett elbilsbatteri illustrerar den maximala laddeffekten hos batteriet i förhållande till dess laddningsnivå [24]. Ett exempel på en laddningskurva visas i figur 2.2.



Figur 2.2: Exempel på laddningskurva med en toppeffekt på 250 kW kring 9 % — 15 % SOC. I resterande laddningstillstånd varierar effekten mycket.

När batteriet har 0% kan laddningseffekten vara relativt hög eftersom det finns gott om utrymme att fylla på energi. När laddningsprocessen fortskrider och batteriet når högre laddningsnivåer, minskar dock dess förmåga att absorbera energi. Vid en viss punkt, vanligtvis när batteriet når en högre laddningsnivå, börjar laddningseffekten minska. Detta fenomen är särskilt påtagligt när batteriet närmar sig sin fulla kapacitet. Batteriet når en punkt där det inte längre kan absorbera energi effektivt och laddningskurvan planar ut. Laddningskurvorna för ett specifikt batteri ger vid en viss SOC en exakt laddeffekt vilket gör det möjligt att beräkna fram exakta tiden det tar att ladda upp fordonet till önskad batterinivå.

2.2 Ekonomiska teorier

Utbud och efterfrågan är två viktiga begrepp inom ekonomi som beskriver hur priser och kvantiteter av varor påverkar varandra på en marknad [26]. Efterfrågan representerar konsumenternas vilja att köpa en vara vid olika prisnivåer, medan utbudet representerar säljarnas vilja att erbjuda varan till olika priser. Dessa två krafter interagerar för att bestämma marknadsjämvikten; det vill säga, hur mycket som köps av varan och till vilket pris.

Oligopol uppstår när en marknad domineras av ett fåtal aktörer, vanligtvis på grund av höga ingångskostnader [27]. Dessa aktörer kan samarbeta och därigenom behålla sin position, vilket kan resultera i högre priser och färre valmöjligheter för konsumenterna. Även om oligopol kan vara stabila och generera vinst för de dominerande företagen, kan det hämma konkurrensen och innovationen.

I ett monopol har en enda aktör fullständig kontroll över marknaden och kan fritt

sätta prisnivåerna [28]. Trots denna makt måste företaget fortfarande överväga efterfrågan, då syftet är att optimera vinsten. Inom laddmarknaden för elbilar är det av stor betydelse att upprätthålla en hög nivå av konkurrens bland aktörerna. En marknad som präglas av stark konkurrens kan leda till lägre priser, förbättrad kvalitet och mer innovation av snabbladdningsstationer. Detta gynnar både konsumenter och samhället i stort. Dessutom främjar det en snabbare övergång till hållbara transportmedel, eftersom företag strävar efter att tillgodose konsumenternas ökande efterfrågan på miljövänliga alternativ.

2.3 Ingångskostnader

Det är viktigt att undersöka ingångskostnader som kan begränsa nya aktörers möjlighet att etablera sig för att förstå dynamiken på marknaden för snabbladdning av elbilar. Dessa kostnader avgör hur enkelt det är för nya företag att träda in på marknaden och konkurrera effektivt. Den mest påtagliga kostnaden är installationen av en ny snabbladdningsstation. Denna kostnad representerar en betydande ekonomisk investering och kan vara avsevärt högre för nya aktörer jämfört med etablerade företag som redan har befintlig infrastruktur och kapital. Detta kan begränsa konkurrensen på marknaden.

Trafikverket uppger att startkostnaden för att installera en laddstation, inklusive elnät, vara 5000 kr per kW [29]. Det innebär att en 150 kW-laddare skulle kosta 750,000 kr medan en 250 kW-laddare skulle kosta 1,250,000 kr. Dessa kostnader är beräknade med en avskrivningstid på 10 år [30].

Estimering av den dagliga driftkostnaden för en snabbladdningsstation kräver att den maximala effekttoppen fastställs. Denna effekttopp beräknas baserat på antalet laddare multiplicerat med den valda effekten, antingen 150 kW eller 250 kW. För att beräkna det genomsnittliga elpriset för 2023, baserat på Vattenfalls data, vilket gäller för alla elområden och uppgår till 69,3 öre per kWh [31]. En annan viktig faktor är överföringsavgiften, som enligt Vattenfall är 27,2 öre per kWh [32]. För kunder som använder 10 till 20 kV är avgiften lägre, alltså är 27,2 öre per kWh en pessimistisk uppskattning för snabbladdningsstationer.

Ytterligare en aspekt att beakta vid beräkning av de dagliga kostnaderna är effektavgifterna. För en 250 kW-laddare uppskattas den dagliga effektavgiften för de 7 sommarmånaderna vara 39,63 kr per kW år 2024, medan för de resterande 5 vintermånaderna är den 95,62 kr per kW för 2024 [33]. För en 150 kW-laddare skulle motsvarande siffra vara något lägre. Den procentuella maxbeläggningen representerar den faktiska mängden kW som utnyttjas från laddaren under den mest belastade timmen under en månad. Denna siffra reflekterar att det är osannolikt att maximal effekt utnyttjas under en hel timme, med tanke på faktorer såsom byte av laddande bilar, varierande laddkurvor och att laddstationen inte kontinuerligt körs på maximal kapacitet. Därför beräknas den procentuella maxbeläggningen till cirka 71 %.

Det är viktigt att notera att dessa beräkningar endast representerar de minimiin-

täkter som krävs för att täcka kostnaderna för en snabbladdningsstation. För att uppnå en lönsam verksamhet kan det vara nödvändigt att fastställa en prissättningsstrategi som också tar hänsyn till andra faktorer såsom konkurrens, efterfrågan och marknadsförhållanden.

2.4 Agentbaserade modell

Agentbaserad modellering, ABM, är en metod som används för att analysera hur beteendet hos individuella interagerande agenter genererar olika typer av makroutfall [34]. I en ABM kan varje agent anpassas för att ha unika egenskaper och beteendemönster. Denna anpassning gör det möjligt för simuleringen att efterlikna verkligheten där individer ofta skiljer sig åt i sina preferenser, beslutsprocesser och interaktionsmönster. Genom att tillåta agenterna agera baserat på enkla beteenderegler kan resultat tas fram på hur förändringar i individuellt beteende och omgivningens påverkan kan leda till kollektiva mönster.

I implementeringen av en agentbaserad modell i ett programmeringsspråk är det lämpligt att använda sig av objektorienterad programmering. Varje objekt i koden representerar en agent i den agentbaserad modellen [35]. Dessa objekten har egna dataattribut och metoder som definierar agentens beteende. Agentens instansvariabler representerar dess interna tillstånd såsom kön eller ålder medan agentens metoder motsvarar dess beteenderegler, exempelvis vid beslutsfattande. Dessa metoder visar hur agenter interagerar med sin omgivning och med andra agenter baserat på deras interna tillstånd och den indata de mottar från sin omgivning.

Agentbaserad modellering låter därmed ett system på makronivå beskrivas av agenters beteende på mikronivå. Komplexa system kan alltså modelleras genom enkla beslutsregler, vilket underlättar för att ta fram effektiva strategier och lösningar på utmaningar.

2.5 Nyttofunktioner

En nyttofunktion används för att kvantifiera individens preferenser eller nytta för olika alternativ eller utfall [36]. Den tilldelar ett numeriskt värde till varje möjligt utfall, vilket representerar individens preferens eller nytta för det utfallet. Nyttofunktioner används för att analysera beslut och förutsäga hur individer kommer att agera i olika situationer. Nyttofunktioner kan definieras valfritt, en av dessa är Cobb-Douglas nyttofunktion [37] som presenteras i ekvationen

$$U = AD^aC^b, \tag{2.1}$$

där U är nyttan, a, b och A är konstanter och D och C är två produktvariabler. Cobb-Douglas-nyttofunktionen är en nyttofunktion där beslutstagaren är riskobenägen [38], vilket innebär att så fort utfallet av en av variablerna är dåligt kommer hela nyttan bli låg. Detta kan jämföras med en linjär nyttofunktion $U = D + C$ där det

ena utfallet inte påverkar det andra. Fortsättningsvis bestäms den relativa vikten av varorna D och C genom kvoten av a/b. Ekvation 2.1 kan deriveras med avseende på D samt C och då fås följande resultat

$$\frac{\partial U}{\partial D} = aAD^{a-1}C^b \qquad \frac{\partial U}{\partial C} = bAD^aC^{b-1}. \tag{2.2}$$

Dessa motsvarar marginalnyttan för D respektive C [39], alltså hur nyttan ökar när någon av dessa produktvariabler ökar. Tas kvoten av ekvationerna i (2.2) fås den marginella substitutionskvoten MRS_{DC}

$$MRS_{DC} = \frac{\frac{\partial U}{\partial D}}{\frac{\partial U}{\partial C}} = \frac{aC}{bD}. \tag{2.3}$$

MRS_{DC} anger hur mycket av vara C en enhet av vara D motsvarar [39]. En högre marginell substitutionskvot innebär att vara D är värd mer än motsvarande mängd av vara C. Att D finns med i nämnaren är för att indikera likgiltighet. Är redan D hög kommer den marginella substitutionskvoten vara låg, alltså är beslutstagaren endast villig att ge lite av C jämfört med fallet om D är låg. Varan C är i täljaren, vilket innebär att om beslutstagaren har mycket av denna vara, är den villig att ge mer av den jämfört med om C är lågt.

3

Modell för snabbladdningsstationer längs en motorväg

Modellen som tagits fram är en agentbaserad modell med elbilsförare som agenter. Elbilsförarna kör på motorvägen och deras antal, samt antal stationer kan varieras. Stationerna är placerade bredvid varandra, alltså förutsätts det att sträckan är densamma till båda stationerna. För varje station går det att variera antal laddare, effekten på laddarna och priset som stationerna tar betalt per kilowattimme. I modellen kan effekten väljas som antingen 150 kW eller 250 kW. Laddningsnivån i en elbil väljs slumpmässigt, samt vid vilken gräns bilarna behöver ladda och vid vilken laddningsivå bilarna slutar ladda. För varje minut åker ett visst antal bilar förbi stationerna. I tabell 3.1 finns en överblick av karakteristik för varje elbil.

Tabell 3.1: Parametrar för elbil

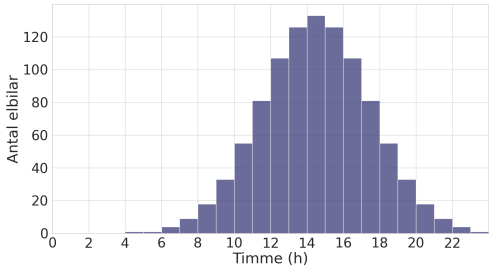
Parameter	Värde
Batteristorlek	78,5 kWh
Högsta mottagbara laddningseffekt	250 kW
Laddningskurva	Se figur 3.3
Verkningsgrad vid laddning	100 %
Laddar vid laddningstillstånd	Under SOC_{undre}
Slutar ladda vid laddningstillstånd	SOC_{topp}
Laddningstillstånd vid början	Slumpmässigt mellan 0 % och 100 %

Ovan syns att varje elbil både har fasta egenskaper, som batteristorlek, samt slumpmässiga egenskaper såsom laddningsnivå. Till slumpmässiga egenskaper tillkommer även preferenser gällande pris och betjäningstid som beskrivs senare. I verkligheten är varje bil unik, även inom en viss bilmodell.

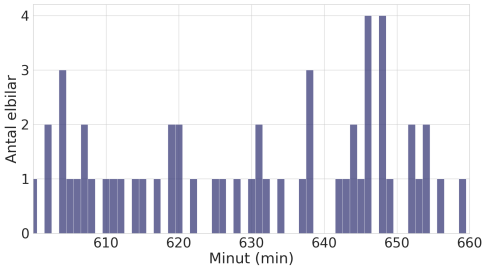
3.1 Flöde av bilar under en dag

Trafikflöde syftar på hur bilar är fördelade under en dag. Hur trafikflödet modelleras varierar men i [40] finns en bred topp med centrum kring klockan 12.00 medan i [41] finns en smalare topp kring klockan 16.00. Med dessa som grund är antalet bilar som kör förbi stationerna normalfördelat. Normalfördelningskurvan har ett

medelvärde på 14:e timmen och en standardavvikelse på tre timmar. Detta innebär att det kommer finnas en topp kring klockan 14.00 med en viss utbredning. På natten kommer däremot flödet vara nästintill noll. När sedan antal bilar per timme bestämts fördelas bilarna på någon av de 60 minuterna under timmen. Denna fördelning är uniform. Resultaten av fördelningarna för en körning ses i figur 3.1.



(a) Fördelning av 1000 bilar per timme. Notera att timmen 0 motsvarar tiden från kl. 00.00 till kl. 00.59 och timmen 23 motsvarar kl. 23.00 till kl. 23.59.



(b) Fördelningen av bilar per minut mellan kl. 10.00 och kl. 10.59. Detta är fördelat uniformt under timmen.

Figur 3.1: Fördelning av bilar under varje dygn samt under en timme. Fördelning sedd på hela dagen är normalfördelad medan fördelningen för en given timme är uniform.

I figur 3.1a ses att kurvan har det karakteristiska standardfördelade utseendet. Notera att majoriteten av bilarna kommer under perioden från kl. 11.00 till kl. 17.00. I 3.1b märks slumpmässighet i modellen, då vissa minuter är överrepresenterade. På grund av avrundningsfel i fördelningen kan det verkliga antalet bilar variera från det ansatta antalet. Denna variation är dock högst några få bilar, och för mer än 100 bilar är avvikelsen mindre än 1 %. För varje dag väljs ordningen på bilarna slumpmässigt. Därefter fördelas bilarna och modellen simulerar varje minut under dagen.

3.2 Beslutsmodell för laddning av elbilar

Under varje minut behandlas alla elbilar som ankommer den minuten. Om laddningstillståndet i bilen, SOC_0 är mindre än SOC_{lower} behöver bilen laddas. När en bil behöver laddas måste den välja en station för att ladda, även om valen är båda dåliga. Med avsikt att bilarna ska verka som beslutsfattande agenter behöver de en beslutsmodell. Bilarna som laddar jämför stationerna utifrån en beslutsmodell som är beskriven i (3.1).

$$U(T, p) = \frac{1}{T^{\beta} \cdot p^{1-\beta}}, \tag{3.1}$$

Där U är nyttan, p är priset per kilowattimme, T är betjäningstiden och β en parameter som används för viktning. Betjäningstiden T inkluderar både tid i kö och

laddningstid. Kötiden anges som tiden bilen behöver vänta för nästa tillgängliga laddare, efter att alla andra bilar i kön har betjänats. Detta innebär att en elbilsförare i denna modell vet hur länge bilarna framför den kommer ladda, som inte nödvändigtvis stämmer i verkligheten. Laddningstiden beror på vilken effekt laddaren levererar samt hur mycket bilen behöver laddas. Nyttofunktionen är på samma form som den allmänna Cobb-Douglas-nyttofunktion beskriven i avsnitt 2.5, förutom att produktvariablerna är inverterade för att markera att ett lågt pris och låg betjäningstid är att föredra.

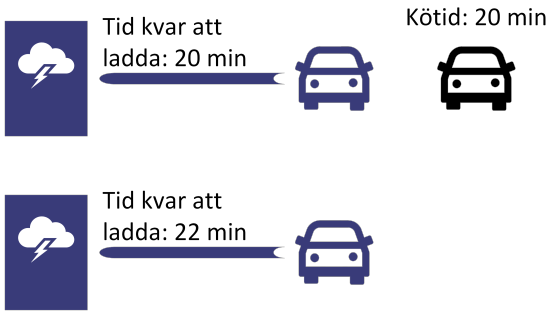
Valet av Cobb-Douglas gjordes med avsikt att inkludera riskbedömning i besluten, alltså att en elbilsförare föredrar balanserade kombinationer av betjäningstid och pris. Ett lågt pris ska inte helt kunna kompensera för en väldigt lång kötid och vice versa. Den station som ger högst nytta kommer väljas av bilen. I fall av att båda stationerna har samma nytta väljs station slumpmässigt. Den relativa vikten av betjäningstid och pris beror på hur β väljs. Den marginella substitutionskvoten av tid för pris, MRS_{Tp} för nyttofunktionen (3.1) ges i ekvationen nedan.

$$MRS_{Tp} = {}^{\frac{\partial U}{\partial T}}\!/_{\frac{\partial U}{\partial p}} = \frac{\beta}{1-\beta} \cdot \frac{p}{T}. \tag{3.2}$$

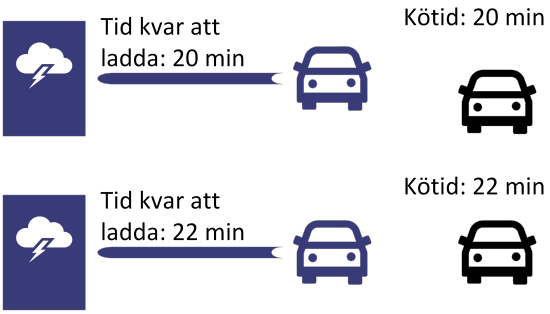
Den marginella substitutionskvoten innebär i detta sammanhang hur stor prissänkning en ökning av betjäningstiden motsvarar. Är substitutionskvoten hög vill elbilsföraren att priset ska sänkas med mycket för att uppväga den ökade betjäningstiden. Den marginella substitutionskvoten ökar om kvoten ${}^{\beta}\!/_{1-\beta}$ ökar. Är betjäningstiden redan lång kommer substitutionskvoten vara låg, som indikerar att en ökning av betjäningstiden kan kompenseras med en lägre prissänkning. Detta speglar att vid en lång betjäningstid är en enhets ökning av betjäningstiden inte lika viktig som vid en kort betjäningstid. Om priset i stället är högt kommer MRS_{Tp} vara hög och priset måste sänkas mycket i syfte av att den ökade betjäningstiden ska kompenseras. Detta speglar att en elbilsförare ska undvika att betala för mycket i relation med vad den får tillbaka.

3.3 Beräkning av betjäningstid

Betjäningstiden i (3.1) är summan av kötid och laddningstid. Kötid mäts som den tid en inkommande bil skulle behöva vänta tills den kan börja ladda. Ett exempel på hur kötid mäts visas med figur 3.2 nedan.



(a) Två bilar under laddning samt en inkommande bil. Bilarna som laddar har 20 min samt 22 min kvar. Kötiden är därmed 20 min.



(b) Två bilar under laddning, en bil i kö och en ytterligare bil har ankommit. Bilarna som laddar har 20 min och 22 min kvar. Bilen som är först i kö kommer betjänas av den första tillgängliga laddaren. Kötiden för den inkommande bilen är därmed 22 min.

Figur 3.2: Tre respektive fyra bilar i behov av laddning, där två av bilarna redan är under laddning.

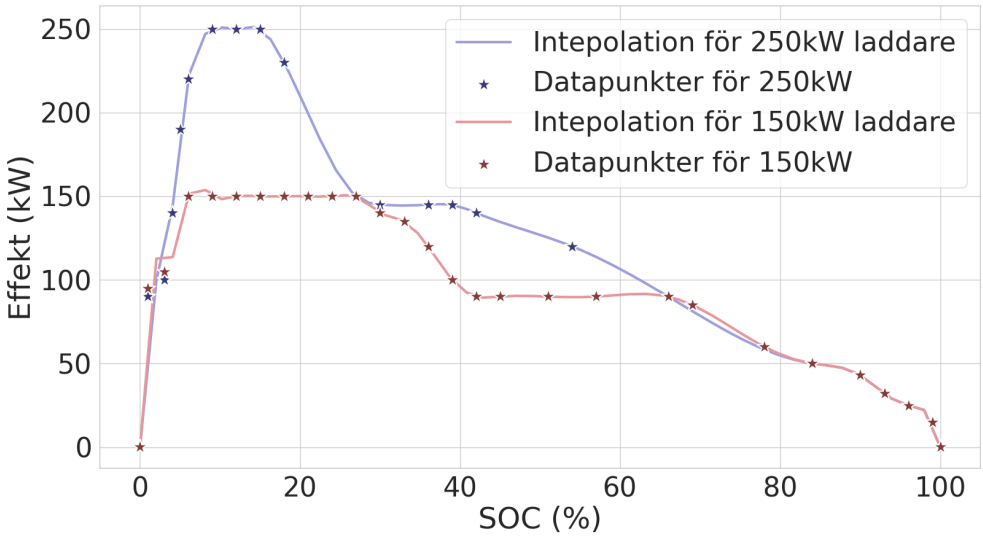
Det märks att kötid är något som snabbt ökar, då den gick från 0 minuter till 20 minuter i figur 3.2a. Hur mycket den ökar beror dock helt på hur långt bilarna har hunnit ladda, vilket ses i att den inkommande bilen i figur 3.2b endast behöver vänta ytterligare 2 minuter. Skulle ytterligare en bil ankomma beräknas kötid som hur långt den bilen behöver vänta för att det snabbaste ledet betjänats. Detta är möjligt genom att modellen alltid vet hur lång laddningstid varje bil har, även de som inte laddar. Detta är omöjligt att veta i verkligheten men kan approximeras [42].
Laddningstiden T_{ladd} erhålls genom att lösa ekvationen

$$E_{laddning} = \int_0^{T_{ladd}} P(SOC)dt, \tag{3.3}$$

där $E_{laddning}$ är energin som batteriet ska laddas med, $P(SOC)$ är effekten vid ett visst laddningstillstånd, SOC är laddningstillstånd (eng. State of Charge, SOC). Ekvationen är en integralekvation där den okända är T_{ladd}. $E_{laddning}$ fås genom

$$E_{laddning} = E_{tot} \cdot (SOC_{topp} - SOC_0)\,, \tag{3.4}$$

där E_{tot} är batterikapaciteten i bilen, SOC_{topp} är laddningstillståndet som ska nås och SOC_0 är laddningstillståndet vid början av laddningen. Effekten beroende på laddningstillstånd, $P(SOC)$ ges av laddningskurvan för batteriet och laddaren. Laddningskurvor för en laddare med maximal effekt 150 kW samt en laddare med maximal effekt 250 kW togs fram baserat på mätdata som en elbilsförare gjort [43]. Dessa mätningar angav effekten med mellanrum på 3 % i laddningstillstånd. Upplösningen i modellen är 1 %. För att få punkter för varje procentsats gjordes kubisk interpolation med splines mellan mätdatan. Denna interpolationsmetod ger ett begränsat fel [44]. Från detta erhölls laddningskurvorna i figur 3.3.



Figur 3.3: Laddningskurvor när elbilen laddas av laddare med maxeffekt 250 kW respektive maxeffekt 150 kW.

Från kurvorna går nu att få effekt i varje punkt mellan varje laddningstillstånd från 0 % till 100 %. Notera att 250 kW-laddaren ger effekten 250 kW endast för några få laddningstillstånd, därefter är effekten mindre. Motsvarande gäller för 150 kW-laddaren. Integralekvationen i 3.4 löstes approximativt genom att summera termer tills summan nådde $E_{laddning}$ eller högre, se (3.5).

$$E_{laddning} = \int_0^T P(SOC)dt \approx \sum_{k=0}^{m} P(SOC(t_k)) \cdot t_{steg}, \tag{3.5}$$

där t_{steg} är tidsteget, m är antal steg, t_k är tiden vid steg k enligt $t_k = k \cdot t_{steg}$. Detta ger att laddningstiden T_{ladd} kommer vara $T_{ladd} \approx m \cdot t_{steg}$. Laddningstider för laddningar från varje laddningstillstånd upp till 100 % beräknades och sparades i en tabell. Denna tabell presenteras i appendix A.

4
Metod

Under följande avsnitt beskrivs de metoder och tillvägagångssätt som har använts. Den framtagna agentbaserade modellen i avsnitt 3 tillämpas för att svara på antal laddare som behövs för att mätta efterfrågan, vilken typ av laddare som är att föredra samt vilken prissätningsmekanism en station bör välja.

4.1 Simuleringsprogram byggt på modell för snabbladdningsstationer

Agenterna i den agentbaserade modellen presenterad i avsnitt 3 representerar elbilsförare. Agenternas beslut följer den framtagna beslutsmodellen och tar hänsyn till förarens preferenser för snabbladdning, med hänsyn till olika faktorer som prissättning, tillgänglighet och tid på dygnet. Ett simuleringsprogram baserat på modellen utvecklades med Python 3.10.12 samt programbiblioteken presenterade i tabell 4.1.

Tabell 4.1: Programbibliotek och versioner

Programbibliotek	NumPy	Seaborn	Matplotlib	pandas	Mesa	SciPy
Version	1.23.5	0.13.2	3.6.0	2.2.0	2.2.4	1.8.0

För att simuleringsprogrammet ska kunna köras krävs även indata. Hur denna samlades in beskrivs i nästkommande avsnitt.

4.1.1 Datainsamling

I datainsamlingsprocessen uppskattades ett antal elbilar längs den valda körsträckan vid olika tidpunkter under dygnet. Samtidigt samlades data in från marknadsundersökningen för att analysera elbilsförarnas preferenser och beteendemönster avseende val av laddstationer. Vidare beräknades total daglig kostnad vid drivande av en snabbladdningsstation.

Väg E6/E20 är en stamväg som bland annat täcker sträckan Halmstad till Göteborg. Avsnittet med ID 5140103 är utanför Varberg och är rödmarkerat i figur 4.1.

Figur 4.1: Karta över en del av väg E6/E20 med avsnitt 5140103 markerat i rött. Taget från [45], karta framtagen av Lantmäteriet och Trafikverket.

Trafikflödesdata för vägen markerad i figur 4.1 presenteras i tabell 4.2.

Tabell 4.2: Årsdygnsmedeltrafik på väg E6/E20 för lätta fordon i båda riktningarna.

År	(kl. 06:00-18:00)	(kl. 18:00-22:00)	(kl. 22:00-06:00)	Summa
2018	18219	3825	1373	23417

Enligt tabellen passerades 23 417 bilar längs den valda motorvägen. Baserat på antagandet att biltrafiken på motorvägen återspeglar genomsnittet för Sverige, skulle cirka 5,86 % [46] av följande fordon vara elbilar. Det innebär att en riktlinje för antal elbilar på en motorväg i Sverige borde vara 1370 bilar. På samma vägstycke finns det en topp av trafikflödet klockan 16.00 med ett lågt flöde under natten, likt fördelning som presenteras i 3.1. Däremot användes klockan 14.00 i modellen.

Priser för snabbladdning inhämtades från [47], vilket är en station med 20 snabbladdare upp till 250 kW längs väg E6/E20. Priserna presenteras i tabell 4.3.

Tabell 4.3: Priser för en snabbladdningsstation med 20 snabbladdare längs väg E6/E20.

Tid på dygnet	Pris inklusive moms	Pris utan moms
00.00 - 16.00	5,20 kr/kWh	4,16 kr/kWh
16.00 - 20.00	5,80 kr/kWh	4,64 kr/kWh
20.00 - 24.00	5,20 kr/kWh	4,16 kr/kWh

I ovan tabell observeras att priset varierar beroende på tid. Basfallet i modellen är däremot att priset är fast. Utifrån hämtade priser kan ses att priset ligger på ungefär 4 kr/kWh exklusive moms, vilket användes i simuleringen.

4.1.1.1 Total kostnad per dygn för en snabbladdningsstation

Totala kostnaden per dygn beräknas genom summan av fasta och rörliga kostnader. Investeringskostnaden för en station betecknas I och avskrivningstiden är T_{avk}. Perioden V_1 motsvarar sommarmånaderna och kostnaderna för den definieras som K_1. Antalet kWh som laddas på stationen under ett dygn definieras som W. Antalet laddare på en station betecknas L. Mängden effekt hos en laddare definieras som E. För period V1 är effektavgiften 39,63 kr/kW/mån. Energiskatten som tillkommer är 0,428 kr/kWh, tillsammans med en elöverföringsavgift på 0,105 kr/kWh. Medelvärdet av antalet dagar per månad är 30,42.

För en station under perioden V_1 beskrivs kostnaden per dygn enligt följande ekvation

$$K_1 = \frac{7}{12} \cdot W(0,428 + 0,105) + \frac{0,71 \cdot 39,63 \cdot L \cdot E}{30,42} + L \cdot \frac{I/T_{avk}}{365}. \tag{4.1}$$

Under perioden V_2, som motsvarar vintermånaderna, finns det en höglastperiod där det tillkommer en höglastningsavgift på 95,92 kr/kW/mån, vilket är den sammanlagda effektavgiften under denna period. Då beskrivs kostnaden per dygn enligt följande ekvation

$$K_2 = \frac{5}{12} \cdot W(0,428 + 0,105) + \frac{0,71 \cdot 95.92 \cdot L \cdot E}{30,42} + L \cdot \frac{I/T_{avk}}{365}. \tag{4.2}$$

Den totala kostnaden i snitt för en station per dygn beräknas som summan av K_1 och K_2 enligt följande ekvation.

$$K_3 = K_1 + K_2 \tag{4.3}$$

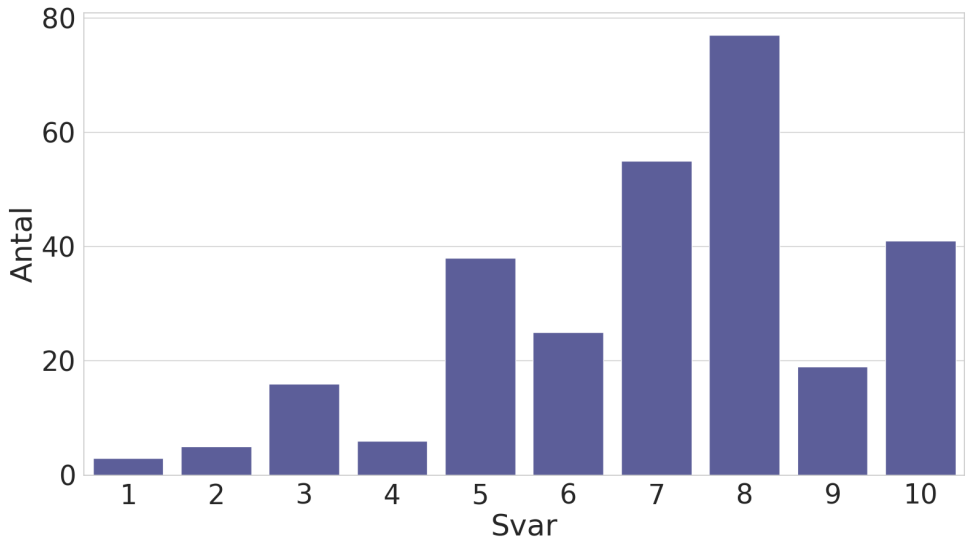
4.1.1.2 Marknadsundersökning

En marknadsundersökning utfördes med tanke att tillhandahålla projektet med nödvändig information för att bedöma agenternas beslut. Undersökningen tillät elbilsförare att uttrycka sina prioriteringar och preferenser kring pris på snabbladdning och laddningstid. Ett frågeformulär skapades och utformades på ett sätt som framhäver respondenternas preferenser samtidigt som deras svar var anonyma. Följande frågor undersöktes i enkäten.

1. Har du elbil idag?
2. När du väljer snabbladdare, hur stor betydelse har laddtid och priset för dig? En skala på 1-10 där 1 motsvarar Lågt pris/Lång laddningstid och 10 motsvarar Högt pris/Kort laddningstid.
3. Hur mycket laddning har bilen vanligtvis kvar när du stannar vid en snabbladdare?

4. Hur många procent har bilen vanligtvis när du lämnar snabbladdaren?
5. Ökar sannolikheten att du väljer samma station igen om du har haft en positiv upplevelse där?

Totalt resulterade undersökningen i 303 svar. Resultatet för fråga 2 finns i figur 4.2.



Figur 4.2: Resultat av marknadsundersökning för fråga 2. Skalan 1-10 motsvarar Lågt pris/Lång laddningstid — Högt pris/Kort laddningstid. Respondenter som svarat ”Nej” på frågan om de har elbil har filtrerats bort.

Marknadsundersökningen frågade om laddningstid, som i modellen endast motsvarar tiden som en bil laddar. Det antas dock att om en förare efterfrågar kort laddningstid efterfrågas även att hela tiden för laddningen, betjäningstiden, ska också vara låg. Fråga 3 och fråga 4 syftade till att hitta när elbilsförare stannar vid snabbladdningsstationer och när de lämnar dem. Utifrån svaren på dessa sattes gränsen på när elbilarna laddar och till vilket laddningstillstånd de laddar. De satta värdena återfinns i tabell 4.4.

Tabell 4.4: Satta beslutsparametrar utifrån marknadsundersökningen.

Beslutparameter	Beteckning
Laddar vid laddningstillstånd	Under 20 %
Slutar ladda vid laddningstillstånd	80 %
β	$\beta \in [0,4; 0,6]$

Beteendemönstret i modellen speglas genom nyttofunktionen, ekvation (3.1) och dess viktningsvariabeln $\beta \in [0,4; 0,6]$. Detta val av β innebär att i det mest extrema fallet $\beta = 0,6$ kommer koefficienten framför den marginella substitutionskvoten för betjäningstid mot pris vara $\beta/(1-\beta) = 0{,}6/0{,}4 = 1,5$, vilket innebär att prissänkningen

måste motsvara 1,5 gånger den ökade tiden. Datan från marknadsundersökningen användes även för att bestämma fördelningen på värden för exponenten β. Sannolikhetsfördelningen för β följer svaren i figur 4.2. Därmed följer att viktningsexponenten β oftast har värden över 0,5. Notera att slumpen avgör vilket β en elbil har. Ett ytterligare beteende i modellen, som dock är lika för alla elbilar, är vid vilket laddningstillstånd bilarna stannar för att ladda och till vilken nivå de laddar. Här valdes typvärdena från undersökningen som motsvarar att elbilarna stannar vid under 20 % och laddar till 80 %.

4.2 Undersökning av antal snabbladdare för att mätta efterfrågan

Genom att kombinera trafikflödesdata med resultaten från marknadsundersökningen är det möjligt att modellera efterfrågan på laddning och undersöka hur många laddare som krävs för att mätta den. Från marknadsundersökningen framgick det att elbilsförare prioriterar kort laddningstid. Detta indikerar att även kötiden bör vara kort. Måttet för kötid bör därmed vara hårt. Här har maximal kötid under ett dygn används som mått, med en minuts upplösning.

Undersökningen inleddes med att se hur den maximala kötiden ändras med antalet snabbladdare med effekten 250 kW. En station skapades längs vägen och på vägen skapades $N_{bilar} = 1000$ elbilar. Antalet snabbladdare på denna station sattes till $N_{laddare} = 1$ och ökades successivt. Modellen kördes 365 gånger och ett snitt av den maximala kötiden togs fram för varje antal snabbladdare. Antalet snabbladdare slutade öka när den maximala kötiden närmade sig 0 minuter. Kötiden avtog markant för de första laddarna medan den minskade mindre när det redan fanns många laddare i systemet. Kötiden och antal laddare vid punkten där ökningen började minska, $T_{brytpunkt}$ noterades. I syfte av att undersöka hur efterfrågan följer antalet bilar ökades därefter antalet bilar i steg. För varje steg ökades antal laddare tills den maximala kötiden föll direkt under $T_{brytpunkt}$. Detta antal noterades som det antal snabbladdare som mättar efterfrågan. Processen beskriven ovan upprepades för snabbladdare med effekt 150 kW. Resultatet presenteras i avsnitt 5.1.

4.3 Undersökning av preferens mellan laddare med effekten 150 kW eller 250 kW

Snabbladdare med maxeffekt 150 kW respektive 250 kW jämförs för att undersöka i vilka fall en station borde bygga den ena typen eller den andra. Skillnaden mellan de båda snabbladdarna är deras laddningskurvor, se avsnitt 3.3, samt deras fasta och rörliga kostnader som beskrivs i 2.3. Snabbladdare med effekt 250 kW är dyrare att bygga och driva vilket innebär att fler 150 kW-laddare kan byggas för samma kostnad. 250 kW erbjuder däremot en kortare laddningstid. Betjäningstiden, som är något elbilarna vill minimera, innehåller både laddningstiden samt den eventuella

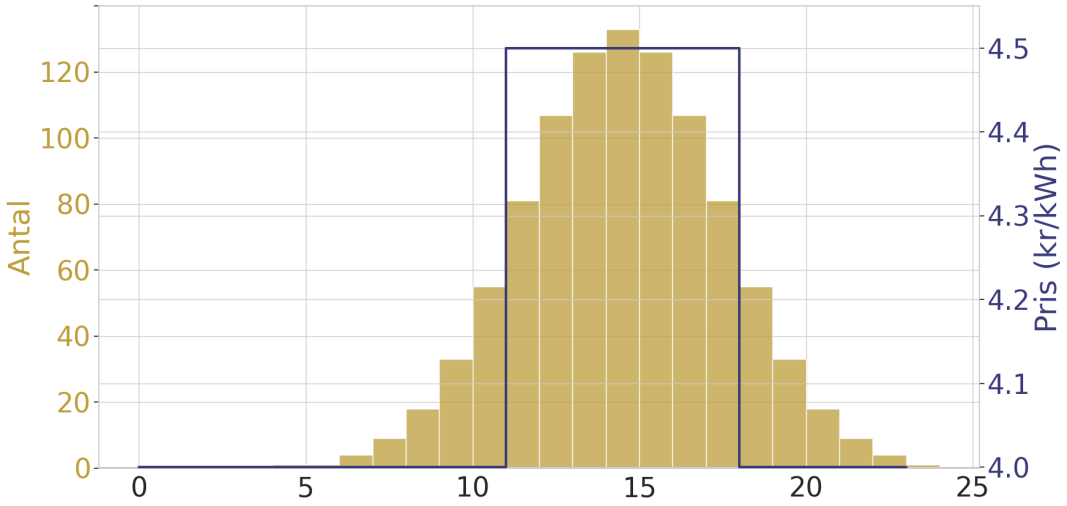
tiden den står i kö. Kötiden påverkas både av effekten som laddarna erbjuder samt antalet laddare på stationen. Det är därmed möjligt att en station med laddare av typen 150 kW kan erbjuda en kortare betjäningstid om den har fler laddare och tillräckligt kort kötid. För att säkerställa en rättvis jämförelse mellan de båda typerna av laddarna utgicks det från att investeringskostnaderna för dem båda skulle vara lika höga. Enligt 2.3 innebär detta att antalet snabbladdare med effekt 250 kW, N_{250kW}, ska förhålla sig till antalet snabbladdare med effekt 150 kW, N_{150kW}, enligt

$$N_{250kW} = 0.6 \cdot N_{150kW} \tag{4.4}$$

Denna undersökning genomfördes genom att skapa två stationer, där den ena endast hade 250 kW-laddare och den andra endast hade 150 kW-laddare. Antalet laddare sattes enligt (4.4) där N_{150kW} varierades för att skapa olika par. En fördelning enligt (4.4) innebär också att de rörliga kostnaderna är lika stora om beräkningarna i 4.1.1.1 genomförs. Därför sattes samma pris på de båda stationerna. Genom dessa inställningar säkerställs att det som elbilsförarna kommer välja mellan är ett färre antal, men snabbare, 250 kW-laddare, eller fler men långsammare 150 kW-laddare. Modellen kördes 365 gånger och medelvinsten per dygn för de båda stationerna noterades, resultatet presenteras i avsnitt 5.2.

4.4 Undersökning av vinst vid rörligt eller fast pris för en snabbladdningsstation

Variation av pris kan antingen innebära att priset sänks eller höjs vid vissa tidpunkter relativt andra stationer. Vilka timmar sänkningen och höjningen görs är ett val för en stationssägare. En utgångspunkt är att höja priser när efterfrågan är hög, eller att sänka priset när efterfrågan är låg. I figur 4.3 syns en höjning av priset mellan klockan 11.00 och klockan 18.00.



Figur 4.3: Variation av pris under ett dygn med antal bilar per timme bakom priskurvan. Notera att de vertikala axlarna har olika enhet och värden.

I figuren ovan observeras att höjningen av priset gjordes under de timmarna med flest bilar. Vilken strategi som är mest lönsam bestämdes utifrån två stationer som konkurrerade över elbilsförare. Den ena hade ett fast pris medan den andra hade ett rörligt pris. För att endast priset ska spela roll hade båda stationerna lika många snabbladdare och med samma effekt. Därefter kördes simulationen och medelvinsten för de båda stationerna noterades. Det fasta priset var satt till 4,0 kr/kWh. Det rörliga priset ändrades enligt tre fall som är beskrivna i tabell 4.5.

Tabell 4.5: Prissättning i de undersökta fallen. Alla priser är exklusive moms.

Fall	Hög belastning (kr/kWh)	Låg belastning (kr/kWh)
A	4,0	3,9
B	4,1	4,0
C	4,1	3,9

Fall A motsvarar en sänkning av priset under timmarna med låg belastning, således från klockan 00.00 — 11.00 samt 18.00 — 24.00. Vid hög belastning är priset samma som för den fasta stationen. Fall B motsvarar en höjning under hög belastning, alltså från klockan 11.00 — 18.00, medan priset är samma som det fasta under låg belastning. Fall C motsvarar en kombination av strategierna A och B, där priset både höjs under hög belastning och sänks under låg belastning. Resultaten presenteras i avsnitt5.3.

5
Resultat

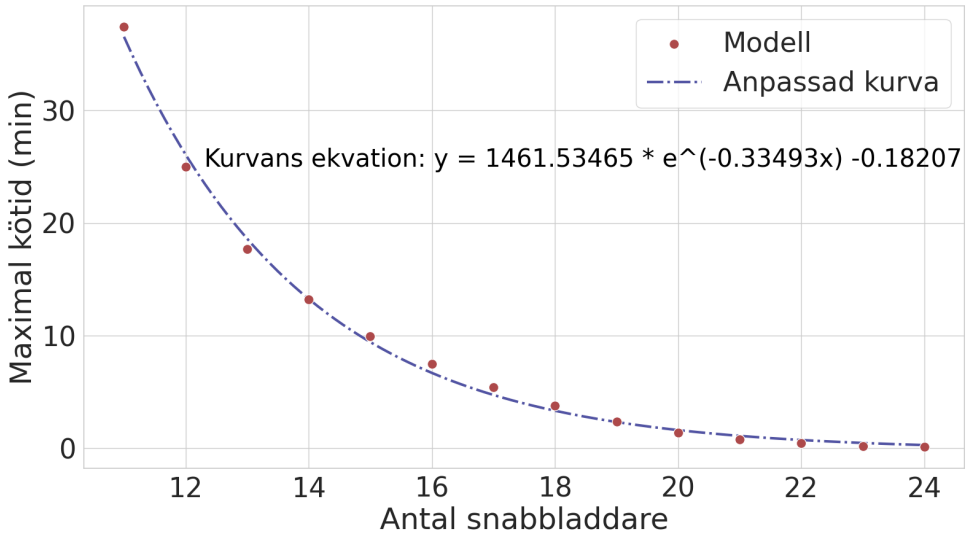
Detta kapitel redogör resultaten från de genomförda simuleringarna och marknadsundersökningen. Genom att presentera data och dess tolkningar belyses viktiga mönster och trender. Figur 5.1 — 5.6 adresserar frågan om hur många laddare som krävs för att tillgodose efterfrågan. Figur 5.7 syftar till att besvara vilken typ av laddare en station bör investera i: 150 kW eller 250 kW. Slutligen belyses valet mellan varierande eller fast pris ur lönsamhetsperspektiv i figur 5.8.

5.1 Simuleringsresultat för mättande av efterfrågan

Att mätta efterfrågan innebär att en elbil ska kunna börja ladda inom en rimlig tid. Vad som är en rimlig tid är subjektivt och skiljer sig mellan individer. Utifrån resultaten i marknadsundersökningen framgår det att majoriteten prioriterar kötid framför priset. Laddare med olika effekt kommer ha olika kötid, där en högre effekt innebär en kortare kötid för samma antal laddare. Nedan följer jämförelser mellan 250 kW-snabbladdare och 150 kW-snabbladdare.

5.1.1 Mättande av efterfråga med 250 kW-laddare

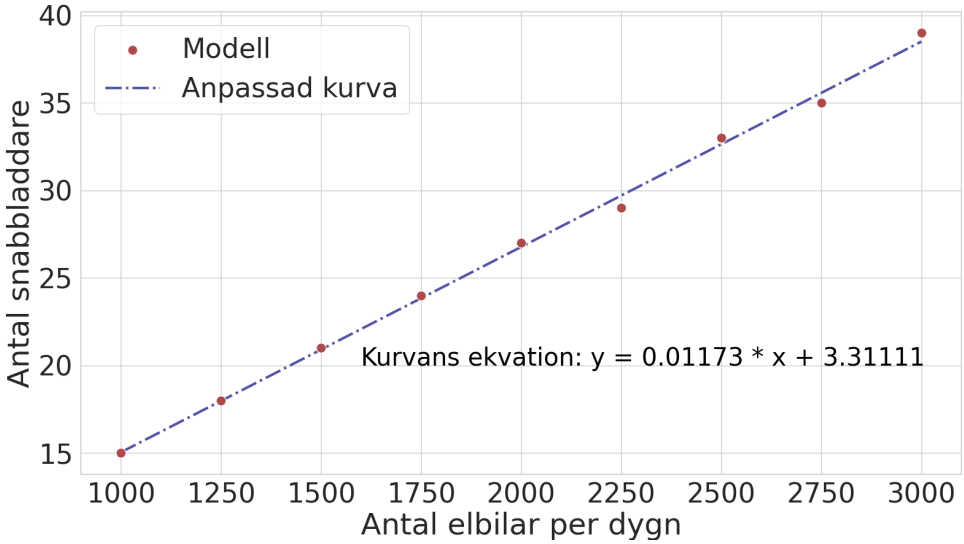
Figur 5.1 demonstrerar resultatet när kötiden undersöks tillsammans med varierande antal 250 kW-snabbladdare för ett flöde av 1000 elbilar under ett dygn. I figuren är en anpassad exponentialkurva inlagd. Kötiden här är medelvärdet av den maximala kötiden per dygn under 365 iterationer. Om antalet laddare ökas blir resultatet att kötiden minskar ungefär exponentiellt.



Figur 5.1: Visar en korrelation mellan antalet snabbladdare med effekt 250 kW och vad de resulterar i för maximal kötid. Efter 20 snabbladdare är medelvärdet av den maximala kötiden under 1 min. Modellen kördes för 1000 elbilar per dygn.

Att kötiden minskar exponentiellt syns även i den anpassade kurvan. Punkterna från simuleringen ligger inte exakt på kurvan.

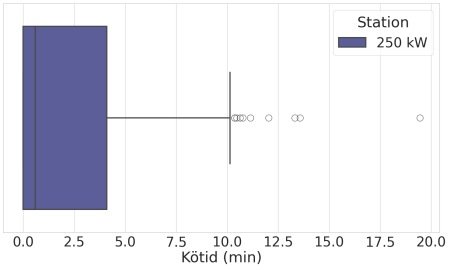
I figur 5.1 observeras att brytpunkten när laddningstidens avtagande börjar minska är kring 14 eller 15 laddare. Om brytpunkten väljs tills 15 laddare erhålls att den maximala kötiden blir $T_{brytpunkt,250kW} = 10$ min. Genom att sätta brytpunkten som ett krav på maximal kötid och sedan öka antalet elbilar och laddare erhölls figur 5.2. Figuren består av punkter, där varje punkt representerar antalet elbilar på motorvägen per dygn och motsvarande antal laddare som krävs för att bibehålla en kötid under $T_{brytpunkt,250kW} = 10$ min. I figuren är även en linjär korrelation inlagd.



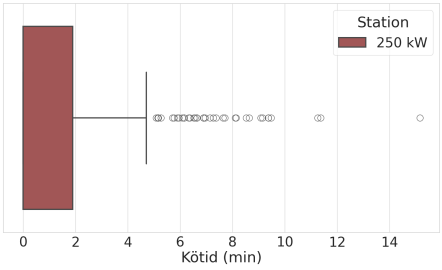
Figur 5.2: Illustrerar sambandet mellan antalet bilar på vägen och antalet laddare som krävs för att bevara den maximala kötiden under 10 minuter.

Från figur 5.2 framtogs en linjär korrelation. Ur lutningen på den linjära korrelationen fås att utbyggnaden av snabbladdare borde vara sådan att det är cirka 85 elbilar på motorvägen per laddare. Utifrån att cirka 20 % av elbilarna behöver laddas per dygn leder detta till att antalet laddande elbilar per snabbladdare blir 17.

Resultaten i figur 5.1 samt figur 5.2 togs fram utifrån medelvärdet på 365 dygn. Fördelningen av maximala kötider över 365 dygn kan ses i figur 5.3. Där undersöktes spridningen för 19 respektive 20 snabbladdare med effekten 250 kW.



(a) Lådagram över maximala kötider med 19 snabbladdare för 365 iterationer. Kvartilavstånd är 4,11 min. Medianen är på 0,6 min.



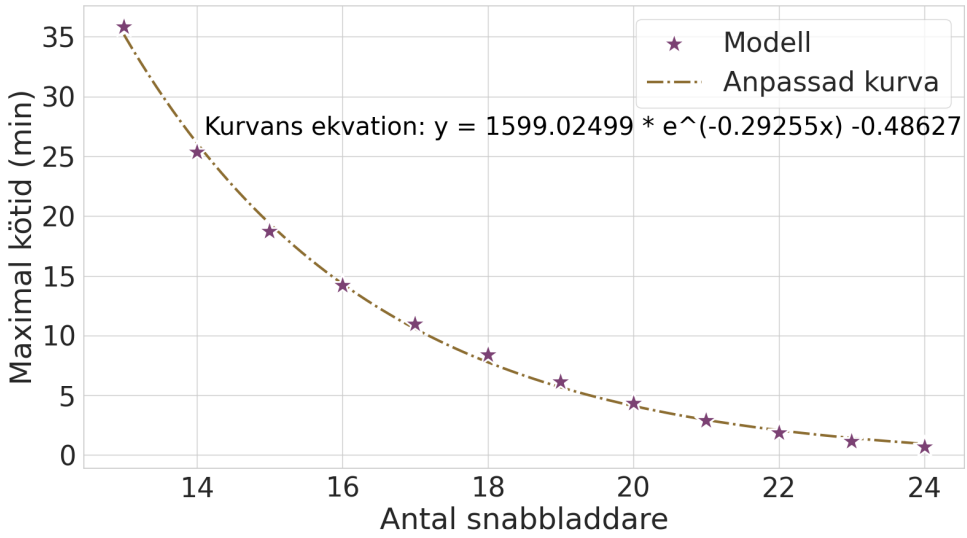
(b) Lådagram över maximala kötider med 20 snabbladdare för 365 iterationer. Kvartilavstånd är 1,90 min. Median är på 0 min.

Figur 5.3: Lådagram över kötid för 19 respektive 20 snabbladdare med effekten 250 kW och 1000 elbilar. Figuren visar spridningen av maximal kötid under 365 dygn simulerade av modellen. Undre kvartilen, medianen och övre kvartilen är markerade med vertikala streck. Cirklarna efter den övre kvartilen är värden som avviker med 1,5 kvartilavstånd.

Från figurerna ovan framgår det att medianvärdet för 19 och 20 snabbladdare är nära varandra. Däremot är spridningen större för 19 snabbladdare jämfört med 20.

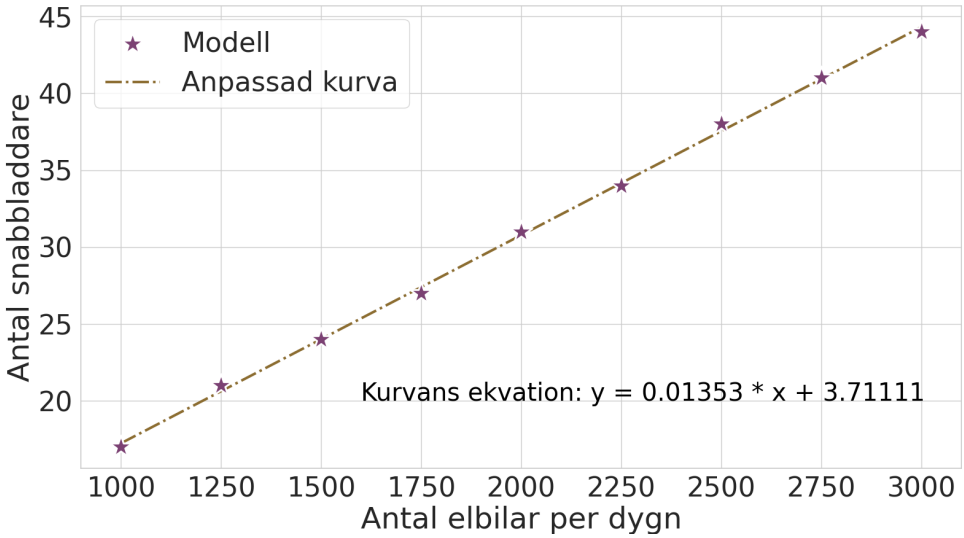
5.1.2 Mättande av efterfråga med 150 kW-laddare

Liknande resultat för snabbladdare med effekt 150 kW framtogs. Figur 5.4 visar sambandet mellan antal laddare och maximal kötid för 150 kW-laddare.



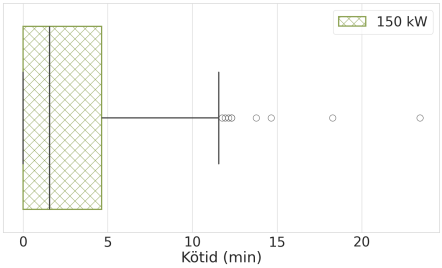
Figur 5.4: Visar en korrelation mellan antalet laddare med effekten 150 kW och vad de resulterar i för maximal kötid. Efter 24 laddare är kötiden under 1 min. Modellen kördes för 1000 elbilar per dygn. Notera att den horisontella axeln börjar vid 13 laddare istället för 11 som i figur 5.1.

På samma sätt som för 250 kW-laddare minskar kötiden ungefär exponentiellt för 150 kW. En exponentiell anpassning är inlagd i figuren. Kötiden avtar långsammare för 150 kW-laddare än för 250 kW-laddare. Genom att öka antalet elbilar och anpassa antalet snabbladdare för en maximal kötid på $T_{brytpunkt,150kW}$ erhölls figur 5.5.

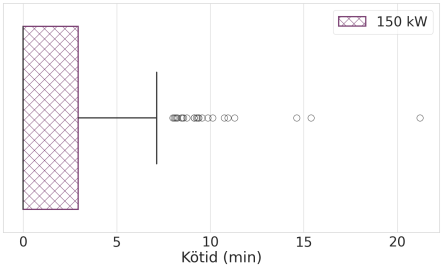


Figur 5.5: Illustrerar sambandet mellan antalet elbilar på motorvägen per dygn och antalet laddare som krävs för att hålla den maximala kötiden under 10,90 min. Laddarna har effekten 150 kW.

Antalet snabbladdare måste öka med antalet elbilar på vägen och denna ökning är linjär. Lutningen motsvarar cirka 74 elbilar på motorvägen per snabbladdare, eller att varje snabbladdare laddar i snitt 14.7 elbilar per dygn. Spridningen på de maximala kötiderna för snabbladdare med effekt 150 kW presenteras i lådagrammen i figur 5.6.



(a) Lådagram över maximala kötider med 21 snabbladdare för 365 iterationer. Kvartilavstånd är 4,65 min. Medianen är på 1,57 min. Punkterna markerar värden som avviker med 1,5 kvartilavstånd.



(b) Lådagram över maximala kötider med 22 snabbladdare för 365 iterationer. Kvartilavstånd är 2,95 min. Median är på 0 min. Punkterna markerar värden som avviker med 1,5 kvartilavstånd.

Figur 5.6: Lådagram över kötid för 21 respektive 22 snabbladdare med effekten 150 kW och 1000 elbilar. Figuren visar spridningen av maximal kötid under 365 dygn simulerade av modellen. Undre kvartilen, medianen och övre kvartilen är markerade med vertikala streck. Cirklarna efter den övre kvartilen är värden som avviker med 1,5 kvartilavstånd.

Fallen ovan valdes med liknande median som i lådagrammen för snabbladdare med effekten 250 kW, figur 5.3. Det märks att spridningen är större för 150 kW-laddare än för 250 kW-laddare. För 150 kW-laddare är spridningen större med färre laddare, som liknar motsvarande i figur 5.3a.

5.2 Simuleringsresultat för val av 150 kW- eller 250 kW-laddare

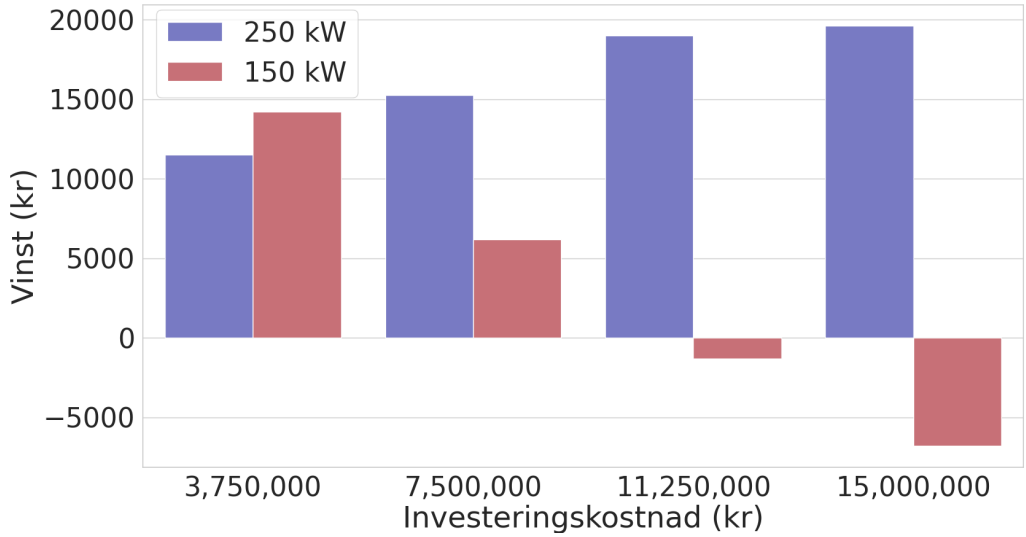
Bedömningen om vilken typ av snabbladdare som är mest lönsam att bygga utgick från en likvärdig investering i båda. Trots att investeringarna är likvärdiga varierar antalet laddare eftersom kostnaden per laddare skiljer sig åt. En 150 kW-laddare kostar 750,000 kr, medan en 250 kW-laddare kostar 1,250,000 kr. Som ett exempel visar den första raden en jämförelse mellan en investering i fem 150 kW laddare och tre 250 kW laddare.

Tabell 5.1: Investeringskostnad och motsvarande antal 150 kW samt 250 kW laddare.

Investering (kr)	Antal 150 kW laddare	Antal 250 kW laddare
3,750,000	5	3
7,500,000	10	6
11,250,000	15	9
15,000,000	20	12

Kombinationerna ovan är de fyra första möjliga paren.

Resultatet av denna undersökning visas i figur 5.7.



Figur 5.7: Visar medelvinst per dag för en station med 250 kW-laddare respektive en station med 150 kW-laddare.

På den horisontella axeln återfinns de olika investeringssummorna, medan den vertikala axeln visar den beräknade vinsten per dag. När investeringen går från 3,750,000 till 7,500,000 kr blir det mer lönsamt att bygga 250-kW laddare än 150 kW-laddare. Det finns en jämviktspunkt där vinsten är lika stor för båda typerna av snabbladdare. Jämviktspunkten inträffar när antalet 250 kW-laddare når 4 och antalet 150 kW-laddare är 6,6. Alltså, vid fler laddare än totalt 10,6 blir det lönsamt att satsa på 250 kW-laddare. I tabell 5.2 syns att summan av vinsterna för de båda stationerna avtar med fler antal laddare längs motorvägen.

Tabell 5.2: Summan av vinsterna för stationerna beroende på totalt antal snabbladdare längs motorvägen

Investering (kr)	Totalt antal laddare	Vinst (kr/dag)	Max. kötid (min)
3,750,000	8	25,000	195
7,500,000	16	21,000	17
11,250,000	24	18,000	7
15,000,000	32	14,000	5

Även om stationen med 250 kW-laddare ökar sin vinst blir utfallet sämre för stationssägare som grupp då summan av vinsterna minskar.

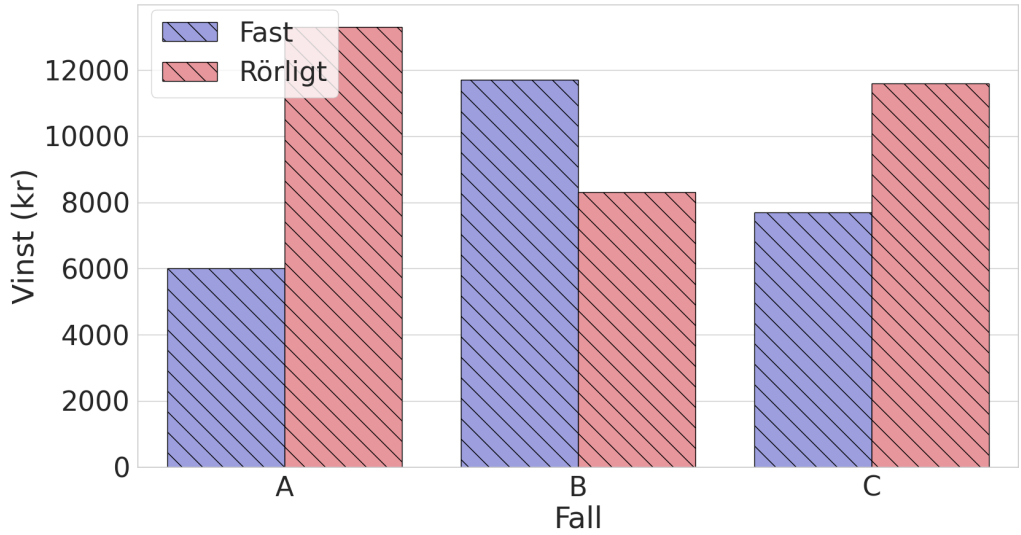
5.3 Simuleringsresultat för beslut gällande fast eller rörligt pris

Vinsten på de olika prissättningsstrategierna har jämförts utifrån tre fall. Fallen utgår ifrån att priset höjs under tider av hög belastning, som i simuleringen motsvarar tiden mellan klockan 11.00 och 18.00, eller att priset sänks under resterande tid av låg belastning. Det fasta priset är alltid 4,0 kr. Hur priset varieras finns beskrivet i tabell 4.5, som upprepas i tabell 5.3.

Tabell 5.3: Prissättning i de undersökta fallen. Alla priser är exklusive moms.

Fall	Hög belastning (kr/kWh)	Låg belastning (kr/kWh)
A	4,0	3,9
B	4,1	4,0
C	4,1	3,9

Dessa prissättningar användes med 1000 elbilar och 7 snabbladdare per station. Figur 5.8 presenterar och belyser förhållandet mellan vinst (vertikala axeln) och tre olika prissättningar (horisontella axeln).



Figur 5.8: Vinst per dag utifrån tre fall där rörligt pris har varierats enligt tabell 5.3.

I figur 5.8 observeras att i fall A och C kan ett rörligt pris vara fördelaktigt, medan ett fast pris kan vara mer gynnsamt i fall B. Det som synes vara av betydelse är att i fall A och C har stationerna med rörligt pris timmar då priset är lägre än dess konkurrent, medan stationen med fast pris har ett lägre pris under hög belastning i fall B.

6
Diskussion

Detta kapitel diskutera resultaten från simuleringar och marknadsundersökningen som genomförts. Till sist diskuteras eventuella samhälleliga och etiska aspekter som kan uppkomma som följd av arbetet. Kapitlet bedömer hur resultaten svarar mot frågeställningarna samt vilka implikationer de kan ha för vidare forskning och praktisk tillämpning. I arbetet har tillgång och pris på snabbladdning undersökts genom att först se hur antalet snabbladdare längs en motorväg påverkar kötid. Detta har betydelse för hur lätt eller svårt det kommer vara att bygga bort köer och därmed säkra tillgänglighet. Här undersöktes även hur antalet laddare måste öka när antalet elbilar ökar. Därefter jämfördes 150 kW-laddare och 250 kW-laddare ur vinstsynpunkt för att försöka se vilken typ en stationsägare borde bygga. Effekt på laddare har betydelse för hur snabbt elbilar kan laddas, där högre effekt är i allmänhet att föredra. Till sist undersöktes om stationer borde variera priser under dagen eller hålla dem fasta. Detta skulle leda till insikt kring om det är möjligt att priserna pressas upp vid tider av hög efterfrågan, eller om istället priserna kommer hållas nere.

6.1 Marknadsundersökning och elbilförares preferenser

Marknadsundersökningen om elbilsförarnas beteenden vid snabbladdningsstationer visar på flera insikter men har också vissa begränsningar. Resultatet av undersökningen visar på relevanta beteenden som direkt kan påverka hur infrastrukturen för elbilsladdning designas. Till exempel visar resultaten att de flesta förare föredrar snabbare laddningstider även om det kostar mer, vilket kan vägleda operatörer i hur de prioriterar investeringar och utformar sina prissättningar.

Några av de förbättringsmöjligheter som framkommit under arbetets gång är bland annat datainsamlingen. Datainsamlingen kan ha en oklar total svarsbredd vilket kan ha resulterat i en mindre representativ svarsgrupp och därmed ge en förvrängd bild av den generella åsikten bland elbilsförare. Undersökningen specificerar inte om resultaten är geografiskt eller demografiskt representativa, vilket är viktigt att överväga då tillgången till laddinfrastruktur varierar markant mellan olika regioner. Användningen av en 10-punkters skala i marknadsundersökningen kan också ha överförenklat komplexa preferenser.

Utöver detta kunde marknadsundersökningen ha gynnats av att inkludera frågor

som utforskar mer djupgående orsaker till val av snabbladdningsstation, såsom säkerhet, tillgänglighet och eventuella ytterligare tjänster. En sådan utökning skulle kunna ge en mer nyanserad bild av vad som faktiskt motiverar användarna att välja en viss snabbladdningsstation. En ytterligare faktor som borde undersökas, som belyses i [48], är att svar på en marknadsundersökning inte alltid speglar verkliga preferenser.

Det är viktigt att notera att marknadsundersökningen inte var det primära fokuset i arbetet, utan användes som indata i modellen. Sammanfattningsvis ger undersökningen vissa insikter i elförares beteenden men mer värde hade erhållits med en utförligare marknadsanalys med fler svar, fler frågor och en efteranalys som säkrar tillförlitlighet.

6.2 Mätta efterfrågan

Att fastställa det nödvändiga antalet laddare längs en väg kräver en definition av vad det innebär att mätta efterfrågan. Resultaten från den genomförda marknadsundersökningen visar att en stor del av förarna prioriterar att betala ett högre pris för kortare laddningstid. Elbilförares behov tillfredsställs således endast om en snabbladdare är tillgänglig inom en acceptabel kötid.

Vad exakt en acceptabel kötid är för den generella elbilsföraren hade däremot behövt vidare forskning. Detta har belysts i rekommendationer framtagna av Handels- och teknikrådet mellan EU och USA [49], där ytterligare undersökningar i nöjdhet för elbilsförare efterfrågas. I forskningen märks att olika mått, som i [50] har det antagits att 80 % av förare maximalt vill vänta 5 minuter, medan i [51] skulle en elbilsförare vägra att ladda om kötiden var över 30 minuter. I [4] skulle istället medelkötiden hållas under 10 minuter. Ett generellt mått för kötid hade underlättat jämförelser. I detta arbete har den maximala kötiden under ett dygn använts. Detta bör vara ett mer pessimistiskt mått än exempelvis medelkötiden. Att den maximala kötiden valts som mått, tillsammans med marknadsundersökningen, borde leda till att vissa insikter kring vad som mättar efterfrågan erhålls.

Figur 5.1 visar att en maximal kötid på 10 minuter uppnås med 15 laddare. Denna kötid motsvarar en punkt på kurvan där minskningen i kötid börjar plana ut, vilket signalerar en minskning i de marginella fördelarna av att lägga till fler laddare. Därför har denna kötid använts som mättande av efterfrågan för 250 kW-laddarna. I figur 5.2 undersöktes hur många laddare som krävs för att hålla den maximala kötiden under 10 minuter med varierande antal elbilar. Resultaten visade att förhållandet mellan antalet elbilar på motorvägen och antalet laddare är ungefär 85 elbilar per laddare. Då endast 20 % av bilarna på vägen behöver laddning motsvarar detta att i snitt 17 elbilar laddas av varje laddare.

Liknande resultat framtogs för laddare med effekten 150 kW, fast då var den maximala kötiden som skulle nås 10,9 min. Färre elbilar kan avklaras per laddare, med 14.7 laddande elbilar per laddare, som motsvarar 75 elbilar på vägen. Ett sådant

resultat är förväntat då det tar längre tid att ladda en bil om lägre effekt används. Resultaten för 150 kW-laddare och 250 kW-laddare beror på antagandet att 20 % av elbilarna kommer behöva snabbladdning. Det är möjligt att bilägare med ett lågt laddningstillstånd är tillräckligt nära sin destination och istället väljer att ladda med en AC-laddare hemma. Då blir tillgängligheten på snabbladdare högre för de elbilar som behöver ladda längs vägen. Om istället fler elbilsförare väljer att bruka snabbladdare kommer tillgängligheten att minska. Viktigt att notera är att totala antalet elbilar i samhället per snabbladdare är högre än det beräknade värdet, då inte varje elbil används varje dag.

De framtagna resultaten av antal laddande elbilar per snabbladdare ligger däremot i linje med vad som framtogs av Witt i [4], där 5370 laddande elbilar mättades medelst 300 laddare. Detta motsvarar att 17,9 laddande elbilar kan behandlas per laddare. Här är det dock viktigt att poängtera att Witt använde medelkötid som ett mått, samt beräknades laddningstid på ett annat sätt tillsammans med andra skillnader i genomförandet.

Det är möjligt att en maximal kötid på 10 min respektive 10,9 min är ett för högt eller för lågt krav. När dessutom spridningen av de maximala kötiderna i figurerna 5.3 och 5.6 undersöktes syntes att den maximala kötiden kan vara högre en medelvärdet, beroende på utfall. Spridningen beror på slumpmässiga skillnader i fördelningen av antalet elbilar som behöver laddning under dygnet. Ett sätt att bekämpa spridningen är att bygga fler laddare. Även om fler laddare inte minskar medelvärdet eller medianen avsevärt kan spridningen däremot minskas. Kvartilavståndet minskade exempelvis med en faktor två för 250 kW-laddarna och en faktor 1,7 för 150 kW-laddarna. Spridningen var allmänt större för laddarna med lägre effekt. Olika stationsägare har potentiellt olika syn på missnöjda kunder, där vissa kan vara villiga att ha fler missnöjda kunder.

Ur ett framtida perspektiv kan resultaten kring att kötiden minskar exponentiellt med antal laddare vara intressant. Detta kan tolkas som att det är relativt enkelt att få ner kötiderna inledningsvis, alltså att en viss nivå av tillgänglighet lätt kan uppnås. Att minskningen avtar innebär dock att det däremot kommer vara svårt att helt ta bort kötid. Än en gång är frågan om vad som borde räknas som mättande av efterfrågan, och därmed tillgänglig snabbladdning, oklar. Här märks dessutom skillnader med Witt [4], där minskningen av medelkötiden inte alls var tydligt exponentiell. Kurvan som presenteras av Witt är mer styckvis linjär, med ett intervall där den linjära avtagningen är mycket starkare än i andra intervall. Om detta beror på andra måttenheter eller skillnader i genomförande är inte fastställt.

6.3 Ska en station bygga 150 kW-laddare eller 250 kW-laddare?

I diskussionen om vilken effekt en laddningsstation bör ha, antingen 150 kW eller 250 kW, spelar figur 5.7 en central roll. Vid åtta laddare totalt, vilket motsvarar en maximal kötid på 195 minuter, framgår det att 150 kW-laddare är ekonomiskt fördelaktigt. Vid jämviktsläget, som inträffar med fyra 250 kW-laddare och 6,6 150 kW-laddare, totalt sett 10,6 laddare, indikerar figur 5.1 en kötid på minst 23 minuter. Däremot när antalet laddare totalt når 16, vilket ger en maximal kötid mellan på 17 minuter, blir stationen med 250 kW-laddare mer lönsam. Jämförs dessa resultat med vad som mättade efterfrågan i avsnitt 6.2 ses att mättande av efterfrågan också borde vara lönsamt.

Fallet med åtta laddare är viktigt att gå djupare i. När laddarna är så få resulterar det i en hög kötid för elbilsförare, se tabell 5.2, och indikerar att utbudet inte når efterfrågan. Att 150 kW-laddarna i sammanhanget är mer lönsamma borde ses som ett resultat av att de kan ta emot fler kunder. Med få laddare blir dessutom kötiden väldigt lång och den långsammare laddningstiden blir relativt oviktig. Om en situation uppstår där snabbladdare inte kommer kunna tillfredsställa efterfrågan är det alltså bäst att minimera kostnader och bygga fler men långsammare laddare, eftersom det låga utbudet tvingar elbilsförare att välja det mindre optimala valet.

Med få laddare blir också den totala vinsten för stationerna som störst, se tabell 5.2. Detta utfall verkar alltså vara bäst för stationsägare som grupp. Däremot vilar det på ett antagande i modellen att elbilsförare som behöver ladda måste ladda. Det är väsentligt att observera marknadsundersökningen indikerar att användarna prioriterar låg kötid. Om förarna vet att de kommer behöva vänta länge på snabbladdning kanske de planerar sin rutt bättre och inte kommer ha behov av snabbladdning, vilket leder till förlorade intäkter. Dessutom kan förare välja att inte köpa elbilar, vilket vore både dåligt för stationsägarna och samhällets transformation till nettonollutsläpp. Således, även om 150 kW-laddaren kan vara fördelaktig i vissa scenarier, kan det ifrågasättas om detta är ett realistiskt och gynnsamt utfall.

I tabell 5.2 märks också att den maximala kötiden för en blandning av snabbladdare med effekterna 150 kW och 250 kW är större i vissa fall än att endast ha snabbladdare med effekten 150 kW. Ett sådant utfall verkar kontraintuitivt, då 250 kW-laddare i blandningen borde innebära att laddningen blir snabbare. Anledningen till detta kan vara at en del elbilsförare väljer att köa till en 250 kW-laddare för att sedan få en snabbare laddningstid. Att ha undersökt betjäningstid närmare hade varit användbart.

Då undersökningen baserats på ett konstant flöde av elbilar kan 150 kW-laddare vara att föredra i andra situationer. Ett tänkbart scenario är när efterfrågan stiger kraftigt under en specifik tid på året, som vid vissa semesterorter. För elbilsförare kan även fler faktorer än tid och pris spela roll. Det är möjligt att batteriets hälsa och livslängd blir olika påverkad beroende på vilken effekt som används. Vidare

används bara två laddningskurvor för alla bilar, men de kan se helt olika ut för olika bilmodeller. Vissa bilar kan maximalt ta emot 150 kW, medan andra får mindre tidsbesparingar med 250 kW-laddare än de som framtogs. Utfallet i verkligheten kan alltså skilja sig. Detta belystes i [52], som undersökte snabbladdning av lastbilar ur vinstsynpunkt. Där visades att snabbladdare med en högre effekt kan bli lönsamma lika fort som snabbladdare med lägre effekt då de kan sälja mer energi under en kortare tid. Däremot spelade inte effekten roll om lastbilarna inte kunde motta den högre effekten.

Forskning hade därmed kunnat undersöka om resultaten ändras med fler laddningskurvor, potentiellt efter hur marknadsandelarna för olika bilmodeller ser ut i nuläget. Det skulle också vara möjligt att använda en potentiell framtida laddningskurva för att förutse hur situationen kan komma att se ut i framtiden. I framtiden bör effekten som en elbil kan motta öka. En fördel med 250 kW-laddare är således att de bör vara mer framtidssäkra. Om nu en stationsägare räknar på en avskrivningstid på tio år vill den förhoppningsvis att snabbladdarna ska fortsätta vara relevanta under dessa år.

Något som borde klargöras är vinstsiffrorna som presenterats. Många av dem ligger runt tiotusen kronor per dag, vilket motsvarar en vinst på 3,650,000 kr per år. En sådan hög vinst är inget som kan garanteras. Storleken på vinsten bygger på antagandet kring hur många elbilar som finns på vägen, antagandet kring andelen elbilar som behöver snabbladdning samt antaganden kring kostnader att driva en snabbladdningsstation. Däremot kan de användas i jämförande syften mellan stationerna, då antagandena är liknande för båda stationerna.

Om antagandena är rimliga innebär de höga vinstsiffrorna att fler snabbladdare kommer byggas, då andra attraheras av de höga vinsterna. Detta kommer sedan pressa ner priserna och bygga ut snabbladdningsnätet. I inledningen till avsnitt 2.1 nämndes att motorvägen som modellen är baserad på har mer än 130 snabbladdare vilket kan vara detta fenomen i verkligheten. Om så är fallet innebär att utbyggnad av snabbladdning kan möjliggöras av privata aktörer. Tillgänglighet kan då säkras genom att privata aktörer bygger mer snabbladdare än som behövs för att konkurrera om marknad. Priserna som sattes utgick ifrån nuvarande priser på en snabbladdningsstation, se avsnitt 4.1.1, vilket skulle innebära att nuvarande priser är godtagbara för stationsägare.

Ett ytterligare fall som hade kunnat behandlas är om det hade varit bättre att ha laddare av olika effekt på samma station. Laddare med 250 kW hade kunnat säkerställa kortare laddningstid samtidigt som kostnaderna hålls nere med 150 kW-laddare. Däremot hade en station med endast 250 kW-laddare erbjudit en bättre tjänst än denna blandning och stjäla kunder, så det är möjligt att konkurrens kommer leda till att alla stationer går mot de högsta effekterna.

6.4 Varierande pris beroende på efterfrågan

Om företagen strävar efter maximal vinst är det fördelaktigt att undvika att pressa priset över konkurrenternas, enligt tabell 5.3 och figur 5.8. Istället visar det sig vara bättre att underminera konkurrenternas priser när efterfrågan på stationerna är låg. Detta förutsätter att konkurrenterna tillämpar fasta priser för sina stationer. Om konkurrenterna även har varierande priser kan detta leda till en kapplöpning om lägre priser eller till och med gemensamma prishöjningar.

Gemensamma prishöjningar vore bäst för stationsägare som grupp, och detta tillsammans med insikten om att så få laddare som möjligt minimerar kostnaderna är fördelaktigt leder till slutsatsen att etablerade stationsägare har motsatta mål till elbilsförare. I avsnitt 2.2 nämns att oligopol är något som sker i marknader med höga ingångskostnader. Om marknaden däremot fungerar borde inte denna situation uppstå, då en marknad med höga vinster och missnöjda kunder borde leda till att konkurrenter uppstår.

Sättet som prishöjningen och sänkningen gjordes kan kritiseras. Höjningen var mellan tiderna 11.00 till 18.00 och det lägre priset var aktivt resterande tider. Det är möjligt att om höjningen gjordes endast vid toppen kring kl. 14.00 skulle vinsten bli högre för en prishöjning. Elpriser varierar också under dygnet, något som inte tagits i hänsyn i modellen. Om denna variation är inräknad kan det dessutom vara nödvändigt att höja priserna under vissa timmar för att motverka ökade kostnader.

Generellt kan nog sägas att möjligheten att variera pris är något positivt. Detta bekräftas av annan forskning [53] som också pekar på att varierande pris är fördelaktigt, särskilt om det går att omfördela efterfrågan. Att omfördela efterfrågan är inget som undersöktes i detta arbete. Hur relevant det är beror på det underliggande antagandet angående om snabbladdning är något som planeras eller som utförs som ett måste. I den här framtagna modellen har snabbladdnings setts som något alla elbilar med ett laddningstillstånd under 20 % måste genomföra. I verkligheten kan dock elbilsförare planera sin laddning, och kanske välja att ladda vid ett högre laddningstillstånd om det innebär ett lägre pris.

6.5 Samhälleliga och etiska aspekter

Marknadsundersökningen har risker med att informationen som insamlas kommer från endast en socioekonomisk klass. Detta innebär att med tanke på den höga kostnaden att köpa elektriska fordon och att användningen främst är i tätbebyggda områden, är det sannolikt att ägarna av elbilar kommer att vara individer med högre inkomster. Detta gör att datan har ett snävare perspektiv, vilket kan göra att glesbygdsbefolkningen och låginkomsttagare ej representeras.

I samband med detta kan det även diskuteras om ett alternativ att minska köbildningar hade varit att kunder kan betala en premie som möjliggör för dem att ladda

på reserverade laddare. Om ett sådant alternativ hade presenterats kan det leda till att minska köbildning som helhet men däremot kunnat uppfattas som en ekonomisk barriär mellan höginkomsttagare och låginkomsttagare. De som har mindre ekonomiska resurser tvingas vänta i kö, medan de mer förmögna kan ladda utan kö. Även om det potentiellt kan minska köbildningen för alla, kan det betraktas som en typ av ekonomisk segregation.

Användardata erbjuder en inblick i hur elbilsförare agerar, men inga förklaringar till deras handlingar. Trafikflödesdata längs motorvägar indikerar antalet resenärer, men ger ingen exakt uppfattning om hur många som kan tänkas ladda sina bilar. Däremot, utifrån den tillgängliga datan, kan man göra antaganden om att en viss andel av resenärerna kan behöva ladda. Dessa antaganden kan leda till svagare slutsatser jämfört med om det fanns specifik data om behovet av snabbladdning.

Resultatet från projektet är relevant för elbilsförare som individer men även för samhället som helhet, då elektrifieringen av fordonsflottan ses som ett viktigt steg mot en mer hållbar värld.

7
Slutsats

En agentbaserad modell har utvecklats för att undersöka tillgänglighet av snabbladdning samt hur vinsten påverkas av prissättning. Modellen kan jämföra snabbladdare med effekten 150 kW respektive 250 kW samt olika antal elbilar och snabbladdningsstationer på vägen.

Genom implementering av modellen hittades att den maximala kötiden minskar exponentiellt med antalet snabbladdare. Fortsättningsvis framtogs att 17 elbilar kan laddas per 250 kW-laddare respektive 14,8 per 150 kW-laddare under ett dygn. Med en sådan utbyggnad kommer den maximala kötiden under ett dygn hållas kring 10 minuter.

Vidare visades att en station med 250 kW-laddare gör en högre vinst än en station med 150 kW laddare, förutsatt att beläggningen inte är för hög. Därtill märktes att en högre vinst kan göras genom att erbjuda ett lägre pris än konkurrenter.

Från dessa resultat kan slutsatsen dras att tillgänglighet av snabbladdning borde kunna erbjudas med priser som kommer hållas nere av konkurrens.

Litteratur

[1] Statistiska centralbyrån. *Tredubbling av elbilar på två år*. 4 april 2023. [Online]. Tillgänglig: https://www.scb.se/hitta-statistik/redaktionellt/tredubbling-av-elbilar-pa-tva-ar2/ (hämtad 2024-02-22).

[2] ACEA. *European EV Charging Infrastructure Masterplan. Key interventions*. Mars 2022. [Online]. Tillgänglig: https://www.acea.auto/files/Research-Whitepaper-A-European-EV-Charging-Infrastructure-Masterplan.pdf (hämtad 2024-05-06).

[3] IEA. *Road transport: Net Zero Emissions Guide*. Paris, Frankrike: IEA, 2023, s. 93. [Online]. Tillgänglig: https://www.iea.org/reports/road-transport (hämtad 2024-01-30).

[4] Andreas Witt. "Determination of the Number of Required Charging Stations on a German Motorway Based on Real Traffic Data and Discrete Event-Based Simulation". I: *LOGI – Scientific Journal on Transport and Logistics* vol. 14.1 (jan. 2023), ss. 1–9. DOI: 10.2478/logi-2023-0001. (Hämtad 2024-05-02).

[5] "Comparing Discrete Event and Agent Based Simulation in Modelling Human Behaviour at Airport Check-in Counter". I: utg. av Masaaki Kurosu. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2016, ss. 511–513. DOI: 10.1007/978-3-319-39510-4.

[6] Wei Yang, Yue Xiang, Junyong Liu m. fl. "Agent-Based Modeling for Scale Evolution of Plug-in Electric Vehicles and Charging Demand". I: *IEEE Transactions on Power Systems* vol. 33.2 (2018), ss. 1915–1925. DOI: 10.1109/TPWRS.2017.2739113.

[7] F. Márquez-Fernández, G. Domingues-Olavarría J. Bischoff och M. Alaküla. "Assessment of Future EV Charging Infrastructure Scenarios for Long-Distance Transport in Sweden". I: *IEEE Transactions on Transportation Electrification* vol. 8 (1 2022), ss. 615–626. DOI: 10.1109/TTE.2021.3065144.

[8] Ittai Abraham, Daniel Delling, Andrew V. Goldberg m. fl. "A Hub-Based Labeling Algorithm for Shortest Paths in Road Networks". I: *10th International Symposium, SEA 2011*. Microsoft Research Silicon Valley. Kolimpari, Chania, Crete, Greece, 2011, s. 230. [Online]. Tillgänglig: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-20662-7_20.

[9] Wenlong Xie, Xinhua Liu, Rong He m. fl. "Challenges and opportunities toward fast-charging of lithium-ion batteries". I: *Journal of Energy Storage* vol. 32 (2020), s. 101837. ISSN: 2352-152X. DOI: https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101837. Tillgänglig: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X20316741.

[10] Andrew Meintz, Jiucai Zhang, Ram Vijayagopal m. fl. ”Enabling fast charging – Vehicle considerations”. I: *Journal of Power Sources* vol. 367 (2017), ss. 216–227. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.07.093. Tillgänglig: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775317309898.

[11] PowerCircle. *Kunskap*. April 2024. [Online]. Tillgänglig: https://powercircle.org/kunskap/ (hämtad 2024-04-25).

[12] ChargeFinder. *Karta*. April 2024. [Online]. Tillgänglig: https://chargefinder.com/se/search (hämtad 2024-04-25).

[13] Energimyndigheten och Trafiktverket. *Handlingsprogram för laddinfrastruktur och tankinfrastruktur för vätgas*. ER 2023:23. Nov. 2023, s. 23. [Online]. Tillgänglig: https://energimyndigheten.a-w2m.se/Home.mvc?ResourceId=218353 (hämtad 2024-04-25).

[14] Svenska kraftnät. *Sveriges Elnät*. 2023. [Online]. Tillgänglig: https://www.svk.se/om-kraftsystemet/oversikt-av-kraftsystemet/sveriges-elnat/ (hämtad 2024-02-22).

[15] Energimarknadsbyrån. *Anslutningsavgift*. 2024. [Online]. Tillgänglig: http://www.energimarknadsbyran.se/el/dina-avtal-och-kostnader/elkostnader/natavgifter/anslutningsavgift/ (hämtad 2024-02-22).

[16] Vattenfall. *Laddinfrastruktur för elektrifierade transporter*. April 2024. [Online]. Tillgänglig: https://www.vattenfall.se/foretag/vara-tjanster/elkraft-som-tjanst/laddinfrastruktur-for-elektrifierade-transporter/ (hämtad 2024-04-26).

[17] Advanced Energy. *How DC Fast Charging Works*. 2024. [Online]. Tillgänglig: https://www.advancedenergy.org/news/how-dc-fast-charging-works (hämtad 2024-02-22).

[18] Svensk Fordonsladdning. *AC och DC laddning, vad är skillnaden?* 2024. [Online]. Tillgänglig: https://www.svenskfordonsladdning.se/ac-och-dc-laddning-vad-ar-skillnaden/ (hämtad 2024-02-22).

[19] U.S. Department of Energy. *Batteries for Electric Vehicles*. 12 mars 2024. [Online]. Tillgänglig: https://afdc.energy.gov/vehicles/electric_batteries.html (hämtad 2024-03-16).

[20] Emmanouil D. Kostopoulos, George C. Spyropoulos och John K. Kaldellis. ”Real-world study for the optimal charging of electric vehicles”. I: vol. 6 (1 nov. 2020), ss. 418–426. DOI: 10.1016/j.egyr.2019.12.008. Tillgänglig: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484719310911.

[21] Tesla. *Tesla Model 3 Manual*. [Online]. Tillgänglig: https://www.tesla.com/ownersmanual/model3/sv_se/GUID-BEE08D47-0CE0-4BDD-83F2-9854FB3D578F.html (hämtad 2024-04-25).

[22] Subaru Sverige. *Subaru Sveriges Laddskola*. [Online]. Tillgänglig: https://www.subaru.se/artiklar/laddskola (hämtad 2024-04-25).

[23] Volvo Cars. *Allt om laddning och räckvidd*. [Online]. Tillgänglig: https://www.volvocars.com/se/edit/artikel/ladda-elbilar-batterier-rackvidd#:~:text=Om%20du%20kontinuerligt%20laddar%20batteriet,g%C3%A5ngen%20den%2012%20augusti%202021. (hämtad 2024-04-25).

[24] Peixin Yin, Nan Wang, Yunlong Shang m. fl. ”Study on the Effect of High Temperature and High-Current Rate on Fast Charging of Lithium-ion Batteries”. I: 2021, ss. 5841–5846. DOI: 10.23919/CCC52363.2021.9550628.

[25] Svensk Fordonsladdning. *Elbilsbatterier, hur fungerar det?* Maj 2021. [Online]. Tillgänglig: https://www.svenskfordonsladdning.se/elbilsbatterier-hur-fungerar-det/ (hämtad 2024-05-06).

[26] Jacob, Öljemark. *Utbud och efterfrågan*. 17 aug. 2023. [Online]. Tillgänglig: https://www.ekonomifakta.se/Fakta/nationalekonomisk-teori/mikroekonomi/utbud-och-efterfragan/ (hämtad 2024-02-22).

[27] Konkurrensverket. *Oligopol*. 2024. [Online]. Tillgänglig: https://www.konkurrensverket.se/konkurrens/om-konkurrens/oligopol/ (hämtad 2024-02-22).

[28] Konkurrensverket. *Monopol*. 2024. [Online]. Tillgänglig: https://www.konkurrensverket.se/konkurrens/om-konkurrens/monopol/ (hämtad 2024-02-22).

[29] Trafikverket. *Kunskapssammanställning stationär laddning till tunga lastbilar*. 2020. [Online]. Tillgänglig: https://bransch.trafikverket.se/contentassets/f1e0a794d4ba4a5d8bf27fd58ed2d23a/kunskapssammanstallning_trafikverket_final.pdf (hämtad 2020-01-20).

[30] Strängnäs Energi. *Frågor och svar*. 2023. [Online]. Tillgänglig: https://www.sevab.com/foretag/el/ladda-bilen/fragor-och-svar/ (hämtad 2023-12-18).

[31] Vattenfall. *Rörligt elpris*. 2024. [Online]. Tillgänglig: https://www.vattenfall.se/elavtal/elpriser/rorligt-elpris/ (hämtad 2024-03-18).

[32] Vattenfall Eldistribution. *Elnatspriser och avtalsvillkor för företag*. 2024. [Online]. Tillgänglig: https://www.vattenfalleldistribution.se/kund-i-elnatet/elnatspriser/elnatspriser-och-avtalsvillkor-foretag/ (hämtad 2024-03-18).

[33] Falbygdens Energi. *Elpriser och villkor*. 2024. [Online]. Tillgänglig: https://falbygdensenergi.se/startsida-foretag/elnatspriser-villkor/ (hämtad 2024-03-18).

[34] Dunja Šešelja. ”Agent-Based Modeling in the Philosophy of Science”. I: *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Utg. av Edward N. Zalta och Uri Nodelman. Winter 2023. Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2023.

[35] Joshua M. Epstein och Robert Axtell. *Growing artificial societies: Social Science from the Bottom Up*. Brookings Institution Press, 1996, s. 220.

[36] Ali E. Abbas and Andrea H. Cadenbach. ”On the Use of Utility Theory in Engineering Design”. I: *IEEE SYSTEMS JOURNAL* (2018).

[37] Nigar Hashimzade, Gareth Myles och John Black. *Cobb–Douglas function*. Oxford University Press, jan. 2017. ISBN: 9780198759430. [Online]. Tillgänglig: https://www.oxfordreference.com/display/10.1093/acref/9780198759430.001.0001/acref-9780198759430-e-438 (hämtad 2024-04-16).

[38] Svend Rasmussen. *Utility Function*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011. Kap. 3, ss. 5–17. ISBN: 9783642216862. DOI: 10.1007/978-3-642-21686-2_3. [Online]. Tillgänglig: https://doi.org/10.1007/978-3-642-21686-2_3 (hämtad 2024-04-16).

[39] Martin Kolmar. *Principles of Microeconomics: An Integrative Approach*. Springer Texts in Business and Economics. Cham, Switzerland: Springer Interna-

tional Publishing, 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-57589-6. (Hämtad 2024-04-18).

[40] Andrzej Sroczyński och Andrzej Czyżewski. ”Road traffic can be predicted by machine learning equally effectively as by complex microscopic model”. I: *Scientific Reports* vol. 13.1 (sept. 2023), s. 14523. DOI: 10.1038/s41598-023-41902-y. (Hämtad 2024-04-25).

[41] Kyeong-Pyo Kang och Gang-Len Chang. ”A robust model for optimal time-of-day speed control at highway work zones”. I: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* vol. 7.1 (2006), ss. 115–123. DOI: 10.1109/TITS.2006.869605.

[42] B. V. Gnedenko och I. N. Kovalenko. *"Introduction to Queuing Theory"*. 2. utg. Birkhäuser Boston, MA, 1989, ss. 136–137.

[43] Tom Moloughney. *Tesla Supercharger Showdown: Is V3 Really Much Faster Than V2?* 25 juni 2021. [Online]. Tillgänglig: https://insideevs.com/reviews/516438/tesla-supercharger-comparison-review/ (hämtad 2024-02-22).

[44] Charles A. Hall and W. Weston Meyer. ”Optimal Error Bounds for Cubic Spline Interpolation”. I: *Journal of Approximation Theory* vol. 16 (2 febr. 1976), s. 107. DOI: https://doi.org/10.1016/0021-9045(76)90040-X.

[45] Trafikverket. *Vägtrafikflödeskartan*. [Online]. Tillgänglig: https://vtf.trafikverket.se/SeTrafikinformation# (hämtad 2024-03-26).

[46] Trafikanalys. *Fordon 2023*. 22 febr. 2024. [Online]. Tillgänglig: https://www.trafa.se/vagtrafik/fordon/ (hämtad 2024-03-26).

[47] *Find us. Tesla*. [Online]. Tillgänglig: https://www.tesla.com/sv_se/findus (hämtad 2024-04-18).

[48] M. Sarstedt och E. Mooi. *A Concise Guide to Market Research*. 2. utg. Berlin, Tyskland: Springer, 2014. Kap. Validity and Reliability, s. 34. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-53965-7.

[49] EU-U.S. Trade och Technology Council. *Transatlantic Technical Recommendations for Government Funded Implementation of Electric Vehicle Charging Infrastructure*. Maj 2023. [Online]. Tillgänglig: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/document/download/aeabfa59-7073-427d-8f92-75cfe5abfca5_en?filename=Transatlantic_Technical_Recommendations_for_Government_Funded_Implementation_of_Electric_Vehicle_Charging_Infrastructure_0.pdf (hämtad 2024-05-06).

[50] Till Gnann, Daniel Goldbach, Niklas Jakobsson m. fl. ”A Model for Public Fast Charging Infrastructure Needs”. I: *EVS29 Symposium, Montreal, Kanada*. 2016, s. 4. [Online]. Tillgänglig: https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/238674/local_238674.pdf.

[51] Anastasia Popiolek, Zlatina Dimitrova, Jean Hassler m. fl. ”Comparison of decentralised fast-charging strategies for long-distance trips with electric vehicles”. I: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* vol. 124 (nov. 2023), s. 103953. DOI: 10.1016/j.trd.2023.103953.

[52] Parth Deshpande, Christopher de Saxe, Daniel Ainalis m. fl. ”Analysis of Fast Charging Arrangements for Electric Heavy Goods Vehicles”. I: *2023 IEEE*

26th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). 2023, s. 6141. DOI: 10.1109/ITSC57777.2023.10422258.

[53] Cheng Fang, Haibing Lu, Yuan Hong m. fl. "Dynamic Pricing for Electric Vehicle Extreme Fast Charging". I: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* vol. 22.1 (2021), s. 540. DOI: 10.1109/TITS.2020.2983385.

A

Appendix A

Tabell A.1: Laddningstid för laddare med maxeffekt 150 kW från 0 % till SOC

SOC	Timmar	Minuter	Sekunder
0	0	0	0
1	0.00844444444444459	0.506666666666676	30.4000000000005
2	0.0165750000000026	0.994500000000158	59.6700000000095
3	0.0243472222222272	1.46083333333363	87.6500000000181
4	0.0313805555555626	1.88283333333375	112.970000000025
5	0.0375166666666679	2.25100000000007	135.060000000004
6	0.0429749999999961	2.57849999999976	154.709999999986
7	0.0480999999999912	2.88599999999947	173.159999999968
8	0.0531861111110976	3.19116666666585	191.469999999951
9	0.0583611111110927	3.50166666666556	210.099999999934
10	0.0636166666666461	3.81699999999876	229.019999999926
11	0.0688833333333209	4.13299999999926	247.979999999955
12	0.0741277777777735	4.44766666666641	266.859999999985
13	0.0793472222222261	4.76083333333357	285.650000000014
14	0.0845666666666786	5.07400000000072	304.440000000043
15	0.089788888888909	5.38733333333454	323.240000000072
16	0.0950194444444727	5.70116666666836	342.070000000102
17	0.100250000000036	6.01500000000218	360.900000000131
18	0.1054805555556	6.328833333336	379.73000000016
19	0.110708333333386	6.64250000000316	398.550000000189
20	0.115933333333394	6.95600000000365	417.360000000219
21	0.121158333333402	7.26950000000413	436.170000000248

Fortsätter på nästa sida

Tabell A.1 – fortsätter från förra sidan

SOC	Timmar	Minuter	Sekunder
22	0.126388888888959	7.58333333333754	455.000000000252
23	0.13162777777783	7.89766666666979	473.860000000187
24	0.136861111111145	8.21166666666871	492.700000000123
25	0.142077777777794	8.52466666666763	511.480000000058
26	0.147274999999998	8.83649999999989	530.189999999994
27	0.152480555555536	9.14883333333215	548.929999999929
28	0.15775277777774	9.4651666666644	567.909999999864
29	0.163147222222166	9.78883333332995	587.329999999797
30	0.168686111111036	10.1211666666621	607.269999999728
31	0.174324999999905	10.4594999999943	627.569999999659
32	0.180024999999886	10.8014999999931	648.089999999588
33	0.185786111110977	11.1471666666586	668.829999999517
34	0.191663888888734	11.4998333333241	689.989999999444
35	0.197736111110936	11.8641666666561	711.849999999369
36	0.204091666666469	12.2454999999882	734.72999999929
37	0.210805555555335	12.6483333333201	758.899999999207
38	0.217949999999755	13.0769999999853	784.619999999118
39	0.225549999999729	13.5329999999837	811.979999999024
40	0.233577777777479	14.0146666666487	840.879999998925
41	0.241958333333006	14.5174999999803	871.049999998821
42	0.250583333332982	15.0349999999789	902.099999998735
43	0.259336111110817	15.560166666649	933.609999998941
44	0.268108333333097	16.0864999999858	965.189999999148
45	0.276847222222043	16.6108333333226	996.649999999354
46	0.285544444444322	17.1326666666593	1027.95999999956
47	0.294219444444379	17.6531666666627	1059.18999999976
48	0.302886111111102	18.1731666666661	1090.38999999997
49	0.311558333333381	18.6935000000029	1121.61000000017
50	0.320244444444549	19.214666666673	1152.88000000038
51	0.328950000000162	19.7370000000097	1184.22000000058

Fortsätter på nästa sida

Tabell A.1 – fortsätter från förra sidan

SOC	Timmar	Minuter	Sekunder
52	0.337669444444664	20.2601666666798	1215.61000000079
53	0.346405555555832	20.7843333333499	1247.06000000099
54	0.355147222222556	21.3088333333533	1278.5300000012
55	0.363894444444835	21.8336666666901	1310.02000000141
56	0.372636111111559	22.3581666666936	1341.49000000161
57	0.381361111111616	22.881666666697	1372.90000000182
58	0.390061111111673	23.4036666667004	1404.22000000202
59	0.398727777778397	23.9236666667038	1435.42000000223
60	0.407358333334009	24.4415000000405	1466.49000000243
61	0.41595277777851	24.9571666667106	1497.43000000263
62	0.424525000000788	25.4715000000473	1528.29000000284
63	0.433083333334178	25.9850000000506	1559.10000000304
64	0.441647222223122	26.4988333333873	1589.93000000324
65	0.450247222223179	27.0148333333907	1620.89000000344
66	0.458908333334347	27.5345000000608	1652.07000000365
67	0.467675000001071	28.0605000000642	1683.63000000385
68	0.476583333334462	28.5950000000677	1715.70000000406
69	0.485683333334522	29.1410000000713	1748.46000000428
70	0.495019444445694	29.7011666667417	1782.0700000045
71	0.504636111112424	30.2781666667454	1816.69000000473
72	0.514580555556934	30.874833333416	1852.49000000496
73	0.524900000001446	31.4940000000867	1889.6400000052
74	0.535636111112627	32.1381666667576	1928.29000000546
75	0.546830555557145	32.8098333334287	1968.59000000572
76	0.55851944444611	33.5111666667666	2010.670000006
77	0.570736111112857	34.2441666667714	2054.65000000629
78	0.583488888890718	35.0093333334431	2100.56000000659
79	0.596788888890806	35.8073333334483	2148.4400000069
80	0.610613888890896	36.6368333334538	2198.21000000723
81	0.624941666668768	37.4965000001261	2249.79000000756

Fortsätter på nästa sida

Tabell A.1 – fortsätter från förra sidan

SOC	Timmar	Minuter	Sekunder
82	0.639727777779976	38.3836666667985	2303.02000000791
83	0.654919444446742	39.2951666668045	2357.71000000827
84	0.670444444446844	40.2266666668106	2413.60000000864
85	0.686216666669169	41.1730000001502	2470.38000000901
86	0.702180555558163	42.1308333334898	2527.85000000939
87	0.718338888891602	43.1003333334961	2586.02000000977
88	0.734769444447265	44.0861666668359	2645.17000001015
89	0.751652777780709	45.0991666668425	2705.95000001055
90	0.769272222225269	46.1563333335161	2769.38000001097
91	0.788094444447614	47.2856666668569	2837.14000001141
92	0.808700000003305	48.5220000001983	2911.3200000119
93	0.831638888892344	49.8983333335406	2993.90000001244
94	0.857272222225845	51.4363333335507	3086.18000001304
95	0.885600000003809	53.1360000002285	3188.16000001371
96	0.916116666670675	54.9670000002405	3298.02000001443
97	0.947763888893105	56.8658333335863	3411.95000001518
98	0.980822222226655	58.8493333335993	3530.96000001596
99	1.0209250000047	61.2555000002817	3675.3300000169
100	1.12593333333872	67.556000000323	4053.36000001938

Tabell A.2: Laddningstid för laddare med maxeffekt 250 kW från 0 % till SOC

SOC	Timmar	Minuter	Sekunder
0	0	0	0
1	0.00862222222222242	0.517333333333345	31.0400000000007
2	0.0175222222222251	1.05133333333351	63.0800000000105
3	0.0260972222222278	1.56583333333367	93.95000000002
4	0.0328166666666723	1.96900000000034	118.14000000002
5	0.0375944444444456	2.25566666666674	135.340000000004
6	0.0413972222222198	2.48383333333319	149.029999999991
7	0.0448222222222166	2.68933333333299	161.35999999998
8	0.0480666666666579	2.88399999999948	173.039999999969

Fortsätter på nästa sida

Tabell A.2 – fortsätter från förra sidan

SOC	Timmar	Minuter	Sekunder
9	0.0512222222222105	3.07333333333263	184.399999999958
10	0.0543527777777631	3.26116666666579	195.669999999947
11	0.057480555555538	3.44883333333228	206.929999999937
12	0.0606166666666461	3.63699999999877	218.219999999926
13	0.0637499999999796	3.82499999999878	229.499999999927
14	0.0668722222222067	4.0123333333324	240.739999999944
15	0.0699999999999893	4.19999999999936	251.999999999962
16	0.0731583333333276	4.38949999999965	263.369999999979
17	0.0763944444444437	4.58366666666662	275.019999999997
18	0.0797361111111156	4.78416666666693	287.050000000016
19	0.0832166666666766	4.99300000000059	299.580000000036
20	0.0868583333333489	5.21150000000093	312.690000000056
21	0.0906861111111326	5.44116666666796	326.470000000077
22	0.09472222222225	5.683333333335	341.0000000001
23	0.0989833333333677	5.93900000000206	356.340000000124
24	0.103477777777819	6.20866666666915	372.520000000149
25	0.10821111111116	6.49266666666959	389.560000000175
26	0.113166666666723	6.79000000000339	407.400000000203
27	0.118313888888953	7.0988333333372	425.930000000232
28	0.123594444444517	7.41566666667103	444.940000000262
29	0.128955555555617	7.73733333333701	464.240000000221
30	0.13435277777782	8.06116666666923	483.670000000154
31	0.139769444444468	8.38616666666811	503.170000000087
32	0.14519444444445	8.71166666666699	522.700000000019
33	0.150624999999987	9.0374999999992	542.249999999952
34	0.156052777777746	9.36316666666475	561.789999999885
35	0.161477777777727	9.68866666666363	581.319999999818
36	0.166891666666597	10.0134999999958	600.809999999751
37	0.172294444444357	10.3376666666614	620.259999999684
38	0.177686111111005	10.6611666666603	639.669999999617

Fortsätter på nästa sida

Tabell A.2 – fortsätter från förra sidan

SOC	Timmar	Minuter	Sekunder
39	0.183083333333208	10.9849999999925	659.09999999955
40	0.188511111110967	11.310666666658	678.639999999483
41	0.19399722222206	11.6398333333236	698.389999999415
42	0.199555555555374	11.9733333333224	718.399999999346
43	0.205191666666466	12.3114999999879	738.689999999276
44	0.210905555555335	12.6543333333201	759.259999999205
45	0.216691666666426	13.0014999999856	780.089999999134
46	0.222547222221961	13.3528333333177	801.169999999061
47	0.228474999999719	13.7084999999831	822.509999998988
48	0.23447222222192	14.0683333333152	844.099999998914
49	0.240541666666344	14.4324999999806	865.949999998838
50	0.246683333332989	14.8009999999794	888.059999998762
51	0.252902777777442	15.1741666666465	910.44999999879
52	0.259199999999705	15.5519999999823	933.119999998938
53	0.265586111110858	15.9351666666515	956.109999999089
54	0.272063888888678	16.3238333333207	979.429999999242
55	0.278647222222055	16.7188333333233	1003.1299999994
56	0.285344444444321	17.1206666666592	1027.23999999955
57	0.292166666666588	17.5299999999953	1051.79999999972
58	0.299127777777744	17.9476666666647	1076.85999999988
59	0.306236111111124	18.3741666666675	1102.45000000005
60	0.313508333333394	18.8105000000036	1128.63000000022
61	0.320955555555665	19.2573333333399	1155.44000000039
62	0.328594444444604	19.7156666666762	1182.94000000057
63	0.336436111111322	20.1861666666793	1211.17000000076
64	0.344502777778042	20.6701666666825	1240.21000000095
65	0.352805555555874	21.1683333333524	1270.10000000115
66	0.361363888889263	21.6818333333558	1300.91000000135
67	0.37020277777821	22.2121666666926	1332.73000000156
68	0.379336111111603	22.7601666666962	1365.61000000177

Fortsätter på nästa sida

Tabell A.2 – fortsätter från förra sidan

SOC	Timmar	Minuter	Sekunder
69	0.388786111111665	23.3271666666999	1399.63000000199
70	0.398577777778396	23.9146666667038	1434.88000000223
71	0.40873055555624	24.5238333333744	1471.43000000246
72	0.419263888889642	25.1558333333785	1509.35000000271
73	0.430200000000825	25.8120000000495	1548.72000000297
74	0.441555555556455	26.4933333333873	1589.60000000324
75	0.453347222223199	27.2008333333919	1632.05000000352
76	0.465591666667724	27.9355000000634	1676.13000000381
77	0.478297222223363	28.6978333334018	1721.87000000411
78	0.491466666667893	29.4880000000736	1769.28000000442
79	0.505097222223538	30.3058333334123	1818.35000000474
80	0.519177777779186	31.1506666667512	1869.04000000507
81	0.533683333334837	32.0210000000902	1921.26000000541
82	0.548586111112712	32.9151666667627	1974.91000000576
83	0.56383888889059	33.8303333334354	2029.82000000612
84	0.579383333335136	34.7630000001082	2085.78000000649
85	0.595147222224128	35.7088333334477	2142.53000000686
86	0.611086111113121	36.6651666667873	2199.91000000724
87	0.627216666668783	37.633000000127	2257.98000000762
88	0.643625000002223	38.6175000001334	2317.050000008
89	0.660491666669001	39.62950000014	2377.7700000084
90	0.678108333335783	40.686500000147	2441.19000000882
91	0.696933333335906	41.8160000001544	2508.96000000926
92	0.717541666669374	43.0525000001625	2583.15000000975
93	0.740483333336191	44.4290000001715	2665.74000001029
94	0.766116666669693	45.9670000001816	2758.02000001089
95	0.794441666669878	47.6665000001927	2859.99000001156
96	0.824955555558967	49.497333333538	2969.84000001228
97	0.856602777781396	51.3961666668838	3083.77000001303
98	0.889663888892724	53.3798333335635	3202.79000001381

Fortsätter på nästa sida

Tabell A.2 – fortsätter från förra sidan

SOC	Timmar	Minuter	Sekunder
99	0.929766666670765	55.7860000002459	3347.16000001475
100	1.03477500000479	62.0865000002872	3725.19000001723

Institutionen för Elektroteknik E2
CHALMERS Tekniska Högskola
Göteborg, Sverige
www.chalmers.se

CHALMERS
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY