



UPPSALA
UNIVERSITET

UPTEC STS 19011

Examensarbete 30 hp
Juni 2019

Ändhållplatsladdning av elbussar

En fallstudie av två stadsbusslinjer i Uppsala

Joacim Törnqvist



UPPSALA
UNIVERSITET

Teknisk- naturvetenskaplig fakultet
UTH-enheten

Besöksadress:
Ångströmlaboratoriet
Lägerhyddsvägen 1
Hus 4, Plan 0

Postadress:
Box 536
751 21 Uppsala

Telefon:
018 – 471 30 03

Telefax:
018 – 471 30 00

Hemsida:
<http://www.teknat.uu.se/student>

Abstract

Opportunity charging of fully electrical buses at terminal stops - A case study

Joacim Törnqvist

This thesis investigates the charging power and battery capacity needed for fast charging of fully electrical buses at end stations in Uppsala, Sweden. The operator, UL, wants to implement electrical buses by 2020 and a new depot for the city buses is being built with possibility to slow-charge the buses overnight. However, due to restrictions in the transmission grid the requested grid connection was denied by Vattenfall Eldistribution. Simulations in this thesis is based on the existing bus schedules for city bus route 6 and route 8 in Uppsala. The routes were selected by UL as suitable candidates for fast charging at end stations. Simulations were made with varying charging power, battery capacity and energy usage by the buses. A worst case-scenario was simulated to ensure that the solution would work even in bad weather conditions. The results show that it is possible to dimension the battery to match the current time schedule. The battery capacity needed depends on charging power, length of route and time available for charging. With 300 kW charging power, the battery capacity needed to manage the bus schedule during weekends were higher than during weekdays. Furthermore, the needed battery capacity for weekends on route 8 were significantly higher than for route 6. If the whole bus fleet would be electrified, the choice of charging technique and battery size depends on the routes and passenger capacity needed. A combination of different charging techniques may be the most efficient solutions when the whole bus fleet is considered.

Handledare: Elias de Faire
Ämnesgranskare: David Lingfors
Examinator: Elisabet Andrésdóttir
ISSN: 1650-8319, UPTec STS 19011

Sammanfattning

Parisavtalet trädde i kraft i slutet av 2016 och har som mål att hålla den globala uppvärmningen under 2 °C, gärna under 1,5 °C. En förutsättning för att uppnå det målet är att utsläppen av växthusgaser minskar. I Sverige infördes 2017 ett ramverk för klimatpolitiken med mål om att Sverige inte ska ha några nettoutsläpp av växthusgaser senast 2045. Inom det målet finns ett etappmål om att den svenska transportsektorn ska minska sina utsläpp av växthusgaser med 70 % till 2030 jämfört med 2010. Ett sätt att minska utsläppen från transportsektorn är elektrifiering, förutsatt att elproduktionen sker med låga eller inga utsläpp av växthusgaser.

Region Uppsala har som mål att kollektivtrafiken i länet ska vara helt fossilfri till 2020. Stadsbusstrafiken uppnådde detta mål redan 2019 då bussflottan drivs av biodiesel, främst Hydrogenated Vegetable Oil (HVO), och biogas. Oro för prisutvecklingen för HVO samt en önskan om att minska buller och andra utsläpp ledde till Region Uppsalas beslut att införa elbussar i stadstrafiken. En ny stadsbussdepå byggs och planeras vara klar våren 2020. När Region Uppsala ansökte om nätanslutning för att ladda elbussar vid den nya bussdepån fick de inte den effekten som de ansökte om. Anledningen till att elnätsägaren, Vattenfall Eldistribution, inte kan möta bussdepåns effektbehov är att det råder kapacitetsbrist i stamnätet in till Uppsala.

Denna studie är en del av *Spetskraft 2020* som är ett Vinnovafinansierat projekt, initierat av Region Uppsala, med mål att ta fram lösningar för hur busstrafiken i Uppsala ska kunna elektrifieras under rådande kapacitetsbrist i elnätet. Genom att flytta laddningen av bussarna från depån till ändhållplatser minskar effektbehovet i depån och laddningen sprids ut både geografiskt och över dygnet vilket kan leda till minskade effekttoppar. Studien syftar till att utreda den tekniska dimensioneringen nödvändig för tilläggladdning vid ändhållplatser för elbussar i Uppsala. Utifrån nuvarande omloppsschema, som bland annat innefattar bussens avgångstider och reglertider vid ändhållplatser, gjordes simuleringar för att dimensionera linje 6 och linje 8 efter ett worst case-scenario. Olika simuleringar gjordes genom att variera bussens energianvändning, laddeffekt och batteristorlek.

Resultaten visar att det är möjligt att följa nuvarande omloppsschema och att dimensioneringen av batteriet beror på laddeffekt, bussens energianvändning samt hur elbussarna implementeras i trafiken. För att inte inskränka bussflottans flexibilitet bör bussarna vara dimensionerade för att kunna köra flera olika omlopp och linjer. Simuleringarna visar att det är helgtrafiken som är dimensionerande för båda linjerna vid rådande omloppsschema och att helgtrafiken på linje 8 ställer högst krav. Med 300 kW laddeffekt kräver helgtrafiken på linje 8 ett batteri som är mer än dubbelt så stort som det som krävs på linje 6. Den dimensionerande lösningen är därför beroende på hur elbussarna ska implementeras i bussflottan och vilken laddeffekt som finns tillgänglig.

Erfarenheter från tidigare studier och elbussprojekt visar att om en hel bussflotta ska elektrifieras är det svårt att hitta en enskild lösning för alla linjerna. Alla laddningsstrategier har för- och nackdelar vilket gör det viktigt att först analysera linjerna och omloppen för att hitta den strategi som är lämplig med avseende på resenärkapacitetsbehov, turtäthet och linjelängd. Effektiviteteten och lönsamheten bör därför utvärderas för hela bussflottan och inte för de enskilda linjerna.

Förord

Detta examensarbete genomfördes våren 2019 och avslutar min civilingenjörsutbildning inom System i teknik och samhälle vid Uppsala universitet. Denna rapport är en del av Vinnovaprojektet *Spetskraft 2020* som leds av Region Uppsala och Biodriv Öst.

Arbetet är skrivet i samarbete med WSP och Region Uppsala och hade inte varit möjligt utan handledning från Elias de Faire och Marcus Nystrand. Till er vill jag rikta ett stort tack för att ni engagerat er i både stora och små frågor och stöttat mig genom arbetet. Jag vill även tacka min ämnesgranskare, David Lingfors, som har bidragit med värdefulla kommentarer och insikter.

Till sist vill jag tacka alla på WSP-kontoret i Uppsala som gett mig ett varmt bemötande och gjort mig till en del av deras vardag. Tack för att ni svarade på alla mina frågor och gjorde dagarna på kontoret till något att se fram emot.

Joacim Törnqvist

Uppsala, juni 2019

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Problembeskrivning	2
1.2	Syfte och frågeställning	2
1.3	Disposition	2
1.4	Avgränsningar	3
1.5	Tidigare studier	3
2	Bakgrund	4
2.1	Kapacitetsbrist i Uppsala	4
2.2	Elkvalitet	5
2.3	Kollektivtrafiken i Uppsala	5
2.4	Elbussar	6
2.4.1	Depåladdning	8
2.4.2	Tilläggladdning	8
2.4.3	Laddning under färd	9
2.4.4	Sammanfattning	10
2.5	Batterier	11
2.6	Nätanslutning	13
2.7	Elbussprojekt	14
3	Metod	15
3.1	Personlig kontakt	15
3.2	Platsbesök	16
3.3	Val av teknik	16
3.4	Beräkningsmodell	19
3.4.1	Dimensionering	21
3.5	Data	22
4	Resultat	23
4.1	Dimensionering	23
4.2	Känslighetsanalys	30
4.2.1	Förkortad laddtid	30
4.2.2	Stödladdning	32
4.2.3	Garanterad laddtid	34
4.2.4	Sammanfattning av känslighetsanalysen	36
5	Analys	36
5.1	Batteristorlek relativt flexibilitet	36
5.2	Känslighetsanalys	39
5.3	Ekonomi	41
5.4	Sammanfattning	41

6	Diskussion	44
6.1	Energianvändning	45
6.2	Batteriets kapacitet	45
6.3	Förslag till vidare studier	46
7	Slutsats	47
	Referenser	48

Tabell 1: Begreppslista

Begrepp	Betydelse
Ändhållplats	Den sista hållplatsen på en busslinje innan bussen vänder.
Busslinje	Förutbestämd linje från ändhållplats A till ändhållplats B.
Omlopp	Omloppet beskriver schemat för en buss. Tid för avgång från ändhållplats A, ankomst till ändhållplats B och vice versa. Omloppen varierar i hur många turer de innefattar.
Omloppsschema	Schema över alla omlopp som är planerade för de olika linjerna.
Reglertid	Den väntetid bussen har från ankomst till avgång vid en ändhållplats. Tiden är specificerat i omloppsschemat för att korrigera för förseningar samt ge raster åt förare.
Tur	En enskild körning från ändhållplats A till ändhållplats B.
Tomkörningar	Sträckor då bussen kör utan passagerare, vanligtvis till och från depån.
Laddeffekt	Vilken eleffekt som batteriet laddas med.
SOC	State of charge, energin i batteriet uttryckt i procent av den totala batterikapaciteten.
Induktiv laddning	Laddning som sker via induktion.
Konduktiv laddning	Laddning som sker via fysisk koppling.
Fullständig laddning	Energin från laddningen motsvarar energin som används vid senaste sträckan.
Ofullständig laddning	Energin från laddningen är mindre än den som användes under senaste sträckan.

1 Inledning

Parisavtalet trädde i kraft i slutet av 2016 och har som mål att hålla den globala uppvärmningen under 2 °C, gärna under 1,5 °C. En förutsättning för att uppnå det målet är att utsläppet av växthusgaser minskar (Naturvårdsverket, 2018). I Sverige infördes 2017 ett ramverk för klimatpolitiken med mål om att Sverige inte ska ha några nettoutsläpp av växthusgaser senast 2045. Inom det målet finns ett etappmål om att den svenska transportsektorn ska minska sina utsläpp av växthusgaser med 70 % till 2030 jämfört med år 2010 (Naturvårdsverket, 2017). Kollektivtrafikens (buss, tåg, spårväg och tunnelbana) koldioxidutsläpp har minskat sedan 2010 till följd av ökad användning av biodrivmedel och stod 2016 för 4 % av utsläppen från inrikes transporter (WSP, 2018b). Nästan hälften av alla bussar körs med Hydrogenated vegetable oil (HVO) vars största råvara, palm fatty acid distillate (PFAD), har klassats som restprodukt från palmoljaframställningen. Priset för HVO riskerar att stiga i framtiden på grund av den så kallade reduktionsplikten¹ och omklassning av PFAD från restprodukt till samprodukt (Maasing, 2019). Detta har lett till osäkerhet kring användningen av HVO i framtiden. Stadsbussar står drygt hälften av alla resor med kollektivtrafiken (Svensk Kollektivtrafik, 2018). Elektrifiering av stadsbussar är ett realistiskt steg mot att uppnå de energieffektiviseringsmål som har satts upp (Trafikförvaltningen SLL, 2017).

UL har som mål att kollektivtrafiken i länet ska vara helt fossilfri till 2020. Ett mål som Gamla Uppsala Buss, bussoperatören för stadsbussarna i Uppsala, uppger är uppnått vid årsskiftet 2019-2020. Bussflottan drivs idag av biodiesel, främst HVO, och Biogas². Oro för prisutvecklingen för HVO samt en önskan om att minska buller och andra utsläpp ledde till att UL 2017 beslutade att införa elbussar i stadstrafiken. De första elbussarna är planerade att vara i trafik till 2020 och över tid ska de ersätta biodieselbussarna³.

En ny bussdepå för stadsbussarna byggs och planeras stå klar till våren 2020. Den nya bussdepån planerades med elbussar i åtanke och att laddning av elbussarna skulle ske vid depån. När Region Uppsala ansökte om den nödvändiga nätanslutningen till Vattenfall Eldistribution fick de inte den effekt som krävs för att fasa in elbussar i den takt som UL önskar. Anledningen till att Vattenfall Eldistribution inte kan möta bussdepåns effektbehov är att det råder kapacitetsbrist i stamnätet in till Uppsala - ledningarna som transporterar el in i Uppsala är helt enkelt fullt belastade. Det innebär att det inte är möjligt att öka effektuttaget i Uppsala redan idag går Uppsala kommun över sitt abonnemang mot Svenska kraftnät med cirka 200 timmar om året (Lindblom, 2018). Att bygga ut elnätet tar tid och kapacitetsbristen i länet riskerar att kvarstå till 2030.

¹Reduktionsplikten innebär att drivmedelsleverantörer måste minska utsläppen av växthusgaser från bensin och diesel varje år. Detta görs genom att öka andelen biodrivmedel i bränslet.

²Personlig kontakt, Tommy Rydbeck, Teknisk chef, Gamla Uppsala Buss, 15/2

³Personlig kontakt, Dennis Solid, Avdelningschef infrastruktur, 12/2 2019.

Spetskraft 2020 är ett Vinnovafinansierat projekt som Region Uppsala startade för att ta fram lösningar för hur busstrafiken i Uppsala ska kunna elektrifieras under rådande kapacitetsbrist i elnätet. Inom projektet ska en sammanställning av tillgängliga tekniker göras samt en konkret idé på hur problemet kan lösas lyftas fram och analyseras. Denna studie är en del av Spetskraft 2020 och undersöker möjligheterna att ladda elbussar utanför depån. Genom att ladda bussarna utanför depån kan effektbehovet från elnätet spridas ut, både geografiskt och över dygnet. Med utgångspunkt i dagens busstrafik har detta arbete undersökt dimensionering av tilläggs-laddning vid ändhållplatser för stadsbusslinjerna 6 och 8 i Uppsala.

1.1 Problembeskrivning

UL beslutade 2017 att införa elbussar i sin stadsbussflotta och att den mest lämpliga lösningen för detta var att bussarna skulle laddas i den nya bussdepån i Fyrislund. Förvaltningen fastigheter och service på Region Uppsala ansvarar för bygget av bussdepån. När de ansökte om nätanslutning till Vattenfall Eldistribution med den önskade anslutningseffekten accepterades den inte. De fick då reda på att det råder kapacitetsbrist in till Uppsala och att de inte kan få mer än 1,5 MW i anslutning under högladdstimmor (06:00 - 22:00) och 4 MW under lågladdstimmorna (22:00-06:00). Med dessa effektbegränsningar komplicerades införandet av elbussar och frågan blev hur många elbussar som elnätet kan hantera. Alternativ kring lösningar vid depån utreds parallellt i ett examensarbete, *Elektrifiering av Uppsalas stadsbussar: Lösningar för att hantera kapacitetsbristen i en växande region*, av Jonas Andersson och Vendela Bernström. Som komplement till det arbetet ska lösningar utanför depån utredas i detta examensarbete.

1.2 Syfte och frågeställning

Region Uppsala vill ha minst 20 elbussar i sin bussflotta till 2030. Detta examensarbete utreder möjligheten att ladda elbussar vid ändhållplatser för att på så sätt öka antalet elbussar som kan tas i bruk utan att öka effektbehovet i bussdepån. Följande frågeställningar har därför formulerats:

- Hur många bussar skulle kunna elektrifieras via tilläggs-laddning vid ändhållplats-laddning i Uppsala?
 - Vilka krav ställer dagens busstrafik på tekniken för att kunna använda tilläggs-laddning vid ändhållplats-laddning?
 - Vad skulle effektbehovet bli vid ändhållplatserna?

1.3 Disposition

Kapitel 2 är ett bakgrundskapitel som beskriver effektbristproblematiken som uppstått i Uppsala. I kapitlet beskrivs viktiga begrepp, kollektivtrafik, elnätet, elkvalitet, kapacitetsbrist, nätanslutning och en genomgång av elbussar och batterier görs. I kapitel 3 beskrivs studiens metod, vilken data som används och den beräkningsmodell som tagits fram. I kapitel 4 presenteras resultaten från beräkningarna som sedan analyseras och diskuteras i kapitel 5 och 6. I kapitel 7 presenteras slutsatser från studien och förslag till vidare studier.

1.4 Avgränsningar

Då resultatet av detta projekt är tänkt att kunna användas inom en snar framtid för att utreda olika laddningslösningar har det avgränsats till att endast undersöka kommersiellt tillgängliga tekniker med hög mognadsgrad. Det gäller både val av batterier och laddningstekniker. En översiktlig genomgång av både beprövad och ny teknik ges för att visa framtida utveckling men huvudfokus kommer att vara på befintliga tekniker med konduktiv laddning.

UL gjorde 2017 en utredning kring ändhållplatsladdning och kom fram till att linje 6, 8 och 9 var lämpliga linjer med avseende på sträcklängd och att ändhållplatserna förväntas vara de samma en lång tid framöver. Linje 9 valdes bort då den inte lämpar sig för ledbussar, vilket UL ansåg vara ett krav för elbussar. Därför fokuserar den här studien på linje 6 respektive 8. En viktig del i arbetet har varit de omloppsscheman som UL har tillhandahållit. I dessa är reglertiden angiven i hela minuter. Med detta som indata har alla tider för laddning presenterats i hela minuter.

I de scenarier som har presenterats avser laddeffekten den effekt som batteriet laddas med. Den effekt som dras från elnätet är högre (storleksordning 10- 20%) då det sker förluster i laddningsinfrastrukturen. Laddningen kompliceras ytterligare då det sker både upp- och nedrampning av laddeffekten för att inte skada batteriet. Detta har beräkningsmodellen inte tagit hänsyn till men det bör utredas närmare.

1.5 Tidigare studier

Intresset för elbussar har ökat och på senare år har ett flertal studier publicerats inom området. Xylia (2018) har i sin avhandling undersökt vilken påverkan storskaligt införande av elbussar skulle ha på utsläppsnivåer och energieffektivitet. Avhandlingen presenterar en modell för att optimera utnyttjandet av olika drivmedel för att minska klimatpåverkan och kostnader. I sitt examensarbete utreder Karlsson (2016) kostnaden för att elektrifiera en hel bussflotta och kom fram till att en kombination av tilläggs-laddning och depå-laddning var den billigaste lösningen. Lindgren (2017) visar att en helt elektrisk bussflotta kan vara den mest kostnadseffektiva lösningen, samt att den sänker bullernivåerna och bidrar till renare luft. Aldenius m.fl. (2016) visar att det ofta är kommuner och regioner som är drivande i omställningen till elbussar för att uppnå uppsatta miljömål. Studien visar även på att helelektriska fordon är vanligare än laddhybrider och att i Sverige är laddning vid depå vanligast följt av tilläggs-laddning vid ändhållplatser. I en jämförelse mellan tilläggs-laddning, depå-laddning och dieselbussar var tilläggs-laddning vid hållplatser det dyraste alternativet över en tidsperiod på 16 år. Däremot var tilläggs-laddning vid ändhållplatser billigare än depå-laddning tack vare mindre batterier. Livscykelkostnaden för tilläggs-laddning vid ändhållplats var 0,95 – 1,13 % dyrare jämfört med dieselbussar beroende på linje. Depå-laddade bussar var däremot 15 – 30 % dyrare än dieselbussar beroende på linje (Lajunen, 2017, 8).

2 Bakgrund

I avsnitt 2.1 görs en kort beskrivning av det svenska elnätet samt problematiken kring kapacitetsbrist. Begreppet elkvalitet beskrivs i avsnitt 2.2. I avsnitt 2.3 presenteras kollektivtrafiken i Uppsala. I avsnitt 2.4 presenteras både nya och etablerade tekniker gällande elbussar och i avsnitt 2.5 beskrivs batteritekniken som används i elbussar. I avsnitt 2.6 beskrivs kostnaden för att ansluta till elnätet. Kapitlet avslutas med en omvärldsbevakning där erfarenheter från både nationella och internationella elbussprojekt redovisas i avsnitt 2.7.

2.1 Kapacitetsbrist i Uppsala

På grund av den kapacitetsbrist som finns i elnätet kring Uppsala blev den tänkta lösningen med depåladdning av elbussar problematisk. För att förstå den problematik som uppstått i Uppsala är det nödvändigt att först förstå vad kapacitetsbrist är och hur den kan lösas. Nedan följer en kort förklaring av elnätet i Sverige och hur det hänger ihop med Uppsalas kapacitetsbrist.

I Sverige produceras mycket av elen i norra Sverige och transporteras genom landet via transmissionsnätet. Sveriges elnät kan delas upp i tre delar med olika spänningsnivåer; stamnätet ($> 220\text{kV}$), regionnätet ($40\text{--}130\text{ kV}$) samt lokalnätet ($< 40\text{kV}$) (IVA, 2016). Stamnätet ägs av staten men förvaltas av Svenska Kraftnät och består av högspänningsledningarna som transporterar stora mängder energi med hög spänning. Regionnätet ansluter till stamnätet men innan elen transporteras vidare i de regionala näten transformeras spänningen ned till $40\text{--}130\text{ kV}$. Från lokala ställverk går elen sedan in i det lokala distributionsnätet, ($< 40\text{ kV}$), som ägs av det lokala nätbolaget. Majoriteten av kunderna är kopplade till lågspänningsnätet med 400 V men det är möjligt att ansluta till högre spänningsnivå om verksamheten kräver höga effektuttag (E.ON, 2019). De största elnätsägarna är Vattenfall, E.ON och Ellevio som tillsammans står för drygt hälften av all eltillförsel i Sverige (IVA, 2016).

Det måste hela tiden råda balans mellan producerad och förbrukad el i elnätet (Energimyndigheten, 2015). Om förbrukningen är högre än produktionen uppstår det effektbrist. Med effektbrist menas att det inte producerats tillräcklig el i Sverige för att tillgodose den momentana förbrukningen. Detta sker oftast under de kallaste timmarna på året och är egentligen inte ett problem då Sverige är ihopkopplat med den europeiska elmarknaden och kan importera el under dessa timmar (Energimarknadsinspektionen, 2018).

I elnätet kring Uppsala råder det kapacitetsbrist vilket skiljer sig från effektbrist. Kapacitetsbrist innebär att det inte går att överföra mer effekt då det enkelt uttryckt är fullt i ledningarna. Det är alltså inte beroende av hur mycket el som producerats i Sverige utan hur mycket effekt som kan transporteras i elnätet. Kapacitetsbristen har uppstått till följd av att antalet elintensiva verksamheter, som till exempel serverhallar och värmepumpar, har ökat i snabbare takt än vad elnätet har byggts ut. Situationen förvärras av att lokal elproduktion läggs ned på grund av låga elpriser vilket gör att det inte längre är lönsamt med till exempel kraftvärme.

Idag är det redan flera städer som har kapacitetsbrist, främst Stockholm, Uppsala, Malmö och Västerås (Energiföretagen, 2019). Problematiken i Uppsala härstammar från en kapacitetsbrist i stamnätet - det är full belastning i ledningarna som transporterar el in till Uppsala. I Uppsala uppmärksammades kapacitetsbristen 2016 när Vattenfall Eldistribution inte fick höja sitt effektuttag mot stamnätet (Nohrstedt, 2019). Svenska Kraftnät jobbar med att lösa kapacitetsbristen genom att bygga ut stamnätet för att öka överföringskapaciteten från norra Sverige. Utbyggnad av stamnätet tar tid och förväntas för Uppsalas del vara klar 2030 (Svenska Kraftnät, 2017). Genom att byta ut äldre ledningar mot nya högt temperetursledningarna hoppas Svenska Kraftnät att ett något högre effektuttag ska vara möjligt i Uppsala redan 2023 (E. Rydegran, 2019)⁴.

2.2 Elkvalitet

När stora laster ska kopplas in i elnätet är det viktigt att undersöka hur det kan påverka elkvaliteten. Det finns olika typer av störningar där spänningsfall, transienter och övertoner är några vanliga exempel. Det är viktigt att upprätthålla en god elkvalitet i elnätet då bristande kvalitet kan skada apparater som är inkopplade. Kortvariga spänningsfall innebär att spänningsnivån i nätet kortvarigt ligger under det normala driftintervallet. Spänningsfall kan uppstå om en stor last kopplas till nätet. God elkvalitet definieras som eltillförsel fri från störningar, spänningsfall, övertoner, obalanser eller frekvensfel och har blivit allt viktigare med fler olinjära laster i systemet (Elsäkerhetsverket, 2015).

När en laddstation för elbussar ska installeras är det viktigt att utreda hur den kommer påverka nätet. Bland annat finns det omriktare, som omvandlar växelström till likström, som kan ge upphov till övertoner (Energiforsk, 2017, 12). Beroende på vilket effektbehov som laddstationen har kan den även orsaka spänningsfall under laddning (Lindberg, 2016). Snabbladdningsstationer för elbussar kräver ett starkt elnät som klarar av höga effektuttag utan att det försämrar elkvaliteten. Nätförstärkning är nästan alltid nödvändig när det gäller snabbladdningsstationer men förutsättningarna är generellt sett bättre i tätorter, där det förutom boende finns andra större förbrukare (WSP, 2016, 75).

2.3 Kollektivtrafiken i Uppsala

Region Uppsala ansvarar för sjukvård, kultur, kollektivtrafik samt regional utveckling i Uppsala län. Förvaltningen *Trafik och samhälle* inom Region Uppsala ansvarar för, upphandlar och utvecklar kollektivtrafiken i Uppsala län. Det inkluderar region- och stadsbussar samt Upptåget. Tillsammans med kommuner i Uppsala län och Trafikverket arbetar Trafik och samhälle för ett hållbart resande i en växande region. Trafiken finansieras med skattepengar och biljettintäkter i ungefär lika stor utsträckning (Region Uppsala, 2019).

⁴Personlig kontakt med representanter från Svenska Kraftnät, 11/2 2019

Varumärket UL är en del av förvaltningen Trafik och samhälle inom Region Uppsala och ansvarar för kollektivtrafiken enligt trafikförsörjningsprogrammet (Region Uppsala, 2019). UL har som mål att fördubbla antalet resor med tåg och buss till 2020 samt att kollektivtrafiken ska vara hållbar och bidra till en god miljö vilket inkluderar att minska utsläpp, buller och trängsel. För att uppnå det har UL som mål att vara fossilfria till 2020. De fossila bränslena ska ersättas med biogas, biodiesel och el. UL planerar att ha de första helelektriska stadsbussarna i trafik till 2020 (UL, n.d.). På uppdrag av UL utförs stadsbusstrafiken av Gamla Uppsala Buss (GUB). I praktiken betyder det att Trafik och samhälle ställer funktionskrav på hur kollektivtrafiken ska fungera och GUB avgör hur trafiken för stadsbussarna ska utformas ut för att uppfylla kraven⁵.

År 2018 bestod stadsbussflottan av cirka 180 bussar där 45 % drevs med biodiesel (HVO), 45 % med biogas och resterande med diesel. Från och med början av 2019 har dieselbussarna försvunnit och trafiken använder nu fossilfria drivmedel till 100 % (Gamla Uppsala Buss, 2018). Priset för HVO riskerar att stiga i framtiden på grund av reduktionsplikten och omklassning av PFAD från restprodukt till samprodukt (Maasing, 2019). Av den anledningen vill GUB minska sitt beroende av HVO och elektrifiering är då ett alternativ för att fortsätta vara fossilfria⁶.

2.4 Elbussar

Användning av elbussar är en växande trend både internationellt och i Sverige (Trafikförvaltningen SLL, 2019c) och drivkrafterna för att ställa om till elbussar är ofta miljö- och hälsorelaterade. Tack vare lägre ljudnivåer, minskade lokala utsläpp samt minskade koldioxidutsläpp har elbussar blivit vanligare i stadstrafiken då städer strävar efter att uppnå utsatta mål för bullernivå och luftkvalitet (Aldenius m.fl., 2016). Elbussar kan även bidra till ökad energieffektivisering och attraktiva stadsmiljöer (Trafikförvaltningen SLL, 2019c).

Det finns olika kategorier av elbussar och de kan delas upp i hybridbussar, laddhybridbussar och helelektriska bussar. En hybridbuss innebär att det finns två drivsystem, ett förbränningssystem som står för majoriteten av framdriften och en elmotor för stöddrift (Trafikförvaltningen SLL, 2017). Batteriet i en hybridbuss laddas genom energiöverföring vid inbromsning. En laddhybrid har ett större batteri än en hybridbuss och batteriet kan laddas externt vilket tillåter eldrift under längre sträckor än med hybridbuss (Trafikförvaltningen SLL, 2017). Med helelektrisk buss menas att bussens enda drivsystem är elektriskt. I konventionella bussar sker uppvärmning med spillvärme från motorn, vilket inte är möjligt med en elmotor då de inte genererar tillräckligt med spillvärme. På grund av dålig isolering sker uppvärmning/kylning i bussar med stora förluster (Trafikförvaltningen SLL, 2019c). Därför används ofta dieselaggregat för att styra komfortkyla/värme i helelektriska bussar då det kraftigt minskar bussens räckvidd om de ska drivas med elenergi från batteriet (Aldenius m.fl., 2016).

⁵Personlig kontakt, Marcus Nystrand, Energisystemingenjör, Region Uppsala 8/5 - 2019.

⁶Personlig kontakt med Tommy Rydbeck, Gamla Uppsala Buss (15/2 2019)

I denna rapport har endast helelektriska elbussar utretts. Trafik med elbussar skiljer sig från konventionell busstrafik. Den största skillnaden är att bussens räckvidd minskar då batterier inte har lika hög energidensitet som flytande drivmedel. Det medför att batteriet kan bli stort och tungt vilket är dyrt och minskar bussens passagerarkapacitet. Det innebär även en minskad flexibilitet då bussen, utöver den kortare räckvidden, behöver tid för att ladda batteriet (Trafikförvaltningen SLL, 2019c), (Rogge m. fl., 2015).

Elbussar är dyrare än konventionella bussar, nästan 40 % dyrare än gasbussar exklusive batterikostnaden, enligt en rapport från WSP (WSP, 2018a), och kräver även etablering av ny infrastruktur för laddning. Även diesel- och gasbussar kräver infrastruktur men den är i många fall redan etablerad. Investeringen i elbussar kan eventuellt balanseras med minskade bränslekostnader och hög utnyttjandegrad av infrastrukturen (Xylia, 2018). Jämfört med konventionella drivmedel är eldrift billigare, men på grund av högre fordonskostnader och infrastruktur blir de totala kostnaderna ofta högre än för konventionella drivmedel. Faktorer som påverkar den totala kostnaden att införa elbussar är antal fordon, förartimmar och körsträcka, vilka alla påverkas av vilken typ av elbussteknik som används (Trafikförvaltningen SLL, 2019c).

Elbussar kan laddas på olika sätt och de kan grovt delas upp i depåladdning, tilläggs-laddning och laddning under färd (Trafikförvaltningen SLL, 2019c). Beroende på vilken teknik som används för att ladda bussarna kan det innebära ett fåtal längre laddtillfällen per dag, många kortare laddningar under dagen eller kontinuerlig laddning (Trafikförvaltningen SLL, 2019c). Vilken teknik som är lämplig beror på många faktorer: turtäthet, linjesträcka, passagerarkapacitet och behov av flexibilitet i fordonsflottan. Depåns placering och utrymme, samt möjligheten till elförsörjning, är andra viktiga parametrar att ta hänsyn till (Trafikförvaltningen SLL, 2017). Om en linje har hög passagerartäthet är det önskvärt med bussar som har hög passagerarkapacitet, är linjesträckan lång är det istället bussens räckvidd som blir viktigast. Ett problem som kan uppstå med en bussflotta som är optimerad efter specifika busslinjer är att flottan kan bli oflexibel och få problem vid till exempel gatuarbete, ersättningstrafik eller evakuering (Trafikförvaltningen SLL, 2017).

Laddning kan göras antingen konduktivt eller induktivt. Induktiv laddning innebär att det inte behöver finnas någon fysisk kontakt mellan bussen och laddningsstrukturen för att batteriet ska kunna laddas. Bussen kan då köra upp på en laddningsplatta som genererar ett magnetfält som inducerar en spänning i en mottagarspole i bussen. Denna spänning ger upphov till en ström som laddar batteriet (Jonsson, 2018). Induktiv laddning är en dyr teknik och den anses inte vara tillräckligt mogen för kommersiell användning i dagsläget (WSP, 2018a), (Trafikförvaltningen SLL, 2019c), (Xylia, 2018). Konduktiv laddning är en mer traditionell typ av laddning där en fysisk kontakt via buss och laddningsstruktur är nödvändig. Det kan ske via en pantograf, stickkontakt eller via skena i marken och är kommersiellt tillgänglig med hög mognadsgrad (Xylia, 2018).

När laddning nämns i denna rapport menas konduktiv laddning om inget annat specificeras. Oavsett lösning är investeringskostnaden högre än för konventionella bussar och för att maximera lönsamheten med elbussar är det viktigt att de är i trafik så ofta som möjligt för att utnyttja den lägre driftkostnaden. Alla tekniker har för- och nackdelar och nedan följer en beskrivning av var och en av dem.

2.4.1 Depåladdning

Depåladdning innebär att bussarna endast laddas vid depån och att laddning sker under lång tid (vanligtvis under natten) med låg laddeffekt, oftast 40–80 kW (Trafikförvaltningen SLL, 2019c). Depåladdade bussar har stora batterier (upp till 600 kWh) som är optimerade för att maximera energilagringen och räckvidden är cirka 15–20 mil (Trafikförvaltningen SLL, 2019c). De stora batterierna och det minimala behovet av laddinfrastruktur gör att depåladdade bussar är flexibla (Energiforsk, 2017). Räckvidden är dock begränsad vilket kräver att bussen laddas under dagen. Det kan leda till behov av extra fordon (Beekman och van den Hoed, 2016). Tekniken är bäst lämpad för trafik med kortare dagliga körsträckor eller då laddning under dagen är möjlig (Trafikförvaltningen SLL, 2019c). Då räckvidden inte tillåter att bussen körs hela dagen anses tekniken inte lämplig för linjer som kräver mycket busstrafik stora delar av dygnet. Räckvidden gör även att depåns läge spelar stor roll då det kan resultera i långa tomkörningar till och från depån för att ladda. För att maximera räckvidden värms bussen ofta med tilläggsvärmare⁷ (Trafikförvaltningen SLL, 2019c). Om depåbussar ska införas i stor skala leder det till att många bussar kommer behöva laddas samtidigt i depån. Det kommer leda till ett stort sammanlagt effektuttag trots att laddning för varje enskild buss sker med låg effekt (WSP, 2018a) (Energiforsk, 2017).

Totalkostnad för en 18 meters led buss som laddas vid depån har i en tidigare studie uppskattats till 7 miljoner SEK, varav batteriet kostar 1,7 miljoner SEK. Kostnad för laddare vid depån uppskattades i studien till 250 000 SEK/buss och 20 000 SEK/år i underhåll (Trafikförvaltningen SLL, 2019c).

2.4.2 Tilläggs-laddning

Tilläggs-laddning innebär att laddning sker löpande under dagen vid hållplatser, ofta ändhållplatser, längs med busslinjen (Trafikförvaltningen SLL, 2019c). Batteriet i dessa bussar är optimerat för att kunna laddas ofta och med hög effekt (Trafikförvaltningen SLL, 2019c) och kan laddas med en effekt upp till 1000 kW. Med hög effekt kan mycket energi laddas i batteriet under kort tid. Genom att ladda bussen oftare och med hög effekt kan ett mindre batteri användas än om det laddas med låg effekt en/ett par gånger per dag. Nackdelen med att ha ett mindre batteri är att det låser bussen till infrastrukturen (Beekman och van den Hoed, 2016) då regelbunden laddning är nödvändig. En stor fördel med tilläggs-laddning är att den totala räckvidden inte blir begränsande om laddningen sker regelbundet. Men det innebär ofta längre omloppstider då tid för laddning måste planeras in vilket kan leda till att fler fordon behövs för att klara trafiken. Då laddtiden ökar med linjens längd bör det inte vara längre än 15 km mellan laddstationerna och turtätheten bör inte vara för hög (Trafikförvaltningen SLL, 2019c) (Trafikförvaltningen SLL, 2017).

⁷Samtal med Joakim Nyman, Senior researcher, RISE Viktoria, 26/4 2019.

Tilläggladdning resulterar i kortare laddtider men det kräver laddning med hög effekt och det kan vara svårt att implementera nödvändig infrastruktur samt hitta tid för laddning i befintliga tidtabeller (Beekman och van den Hoed, 2016) (Energiforsk, 2017). De längsta uppehållstiderna finns oftast vid ändhållplatserna, för att ge marginal för att hålla tidtabellen samt möjlighet för föraren att ta rast. Dessutom är de ofta placerade lite utanför staden vilket gör det lättare att få plats med laddstationer (Rogge m. fl., 2015). Det finns två sätt att ställa upp en laddstation, antingen placeras nätstationen bredvid laddstationen eller så integreras de i varandra. Den integrerade lösningen tar mindre plats men kräver ett högspänningsabonnemang. Separeras laddstation och nätstation räcker det med ett lågspänningsabonnemang men det tar istället mer markyta i anspråk (WSP, 2018a). Utöver installation av infrastruktur vid hållplatser bör det finnas möjlighet till långsam laddning vid depån för underhåll av batteriet (Trafikförvaltningen SLL, 2017).

Tilläggladdning vid ändhållplatser (även kallad ändhållplatsladdning) är en relativt beprövad teknik som ger möjlighet till hög kapacitet i trafiken. Dock begränsar det flexibiliteten i bussflottan och gör det svårare att ändra busslinjer (WSP, 2018a) (Energiforsk, 2017). Med tilläggladdning vid hållplatser (även kallad hållplatsladdning) kan batteristorleken minskas ytterligare men det inskränker flexibiliteten ännu mer. För att motverka att flexibiliteten begränsas för mycket kan ett större batteri än nödvändigt användas (Energiforsk, 2017). Tilläggladdning är starkt beroende av lokala begränsningar (Xylia, 2018), och kräver nästan alltid någon form av nätförstärkning (WSP, 2018a). Vanligast idag är att laddning sker via pantograf, antingen på bussen eller på stolpe, i kombination med långsam laddning i depån för att maximera batteriets livslängd (Trafikförvaltningen SLL, 2019c).

Total inköpskostnad för en 18-meters buss är 7 miljoner SEK, varav batteriet står för 800 000 SEK (Trafikförvaltningen SLL, 2019b). Kostnad för laddinfrastruktur uppskattas till 3 miljoner SEK per pantograf (inkluderat installation) och 150 000 SEK/år i drift (Trafikförvaltningen SLL, 2019b). Kostnad för nätanslutning uppskattas till cirka 500 000 SEK för 600 kVA och kostnad vid depån uppskattas till 250 000 SEK per buss (WSP, 2018a).

2.4.3 Laddning under färd

Laddning under färd kan göras med tre olika tekniker och kallas ibland för "elvägar". De tre teknikerna är kontaktledning i luften, induktiv laddning under färd samt elskena i vägen. Induktiv laddning kräver att spolar grävs ned under vägbanan som då laddar bussen när den kör över dem. Med laddning via elskena har bussen en så kallad släpkontakt som kopplar till skenan i vägbanan. Varken induktiv laddning under färd eller elskena är kommersiellt tillgängligt i dagsläget och kommer därför inte att utredas vidare (Trafikförvaltningen SLL, 2017).

Genom att ladda bussen via kontaktledning (likt spårväg) kan laddning ske kontinuerligt under färd. Laddning under färd kräver inga ändringar i körschemat för att ge tid till laddning och inga extra fordon krävs. Med kontinuerlig laddning ökar även möjligheten att ha uppvärmning med el istället för med tilläggsvärmare (Trafikförvaltningen SLL, 2019c). Med tråddrift blir varken räckvidd eller

laddningstider begränsande men infrastrukturen innebär en minskad flexibilitet.

Laddning under färd kräver stora investeringar i infrastrukturen och dessa har en stor påverkan på stadsbilden (WSP, 2018a) (Trafikförvaltningen SLL, 2019c) (Beekman och van den Hoed, 2016). Hög utnyttjandegrad av infrastrukturen fås genom att placera tråd på sträckor som trafikeras av flera olika linjer vilket kan minska investeringskostnaderna (Trafikförvaltningen SLL, 2019c). Laddning under färd lämpar sig för linjer med mycket hög turtäthet och högt kapacitetsbehov (Trafikförvaltningen SLL, 2017). In motion charging (IMC) är ett alternativ som möjliggör lite bättre flexibilitet och mindre investering i infrastruktur. Bussen har då ett batteri (cirka 50 kWh) som laddas via kontaktledning under färd (Beekman och van den Hoed, 2016). Bussen kan då köra kortare sträckor på batteri vilket innebär att kontaktledningarna inte behöver täcka hela linjen (Trafikförvaltningen SLL, 2019c).

Totalkostnad för en 18-meters buss är 7,8 miljoner kronor varav batteriet kostar cirka 500 000 SEK. Kostnad för infrastruktur är 9 miljoner SEK/km kontaktledning och underhåll beräknas till 100 000 SEK/km årligen (Trafikförvaltningen SLL, 2019b).

2.4.4 Sammanfattning

I övergången från fossila drivmedel är det inte en fråga om att ett energislag kommer kunna ersätta allt. Istället bör energislag väljas med avseende på miljö, ekonomi och trafikbehov. Detsamma gäller för val av infrastruktur för elbussar där det finns flera aspekter som behöver tas med i beslutet, till exempel teknisk mognad för infrastrukturen och vilken räckvidd samt flexibilitet som krävs för trafikarbetet. Även skalbarhet av lösningen och linjernas passagerarkapacitet påverkar vilken lösning som är lämplig. Lokala begränsningar och möjlighet till elförsörjning sätter också ramar för vad som är möjligt (WSP, 2016).

Tekniker som kräver mer omfattande infrastruktur lämpar sig bäst för stabila linjer, till exempel stomlinjer (Trafikförvaltningen SLL, 2017). För att avgöra den ekonomiska lönsamheten av en teknik är det viktigt att se det ur ett systemperspektiv. Med effektiv trafikering kan lösningar med stora investeringar i infrastruktur ha lägre total kostnad (Trafikförvaltningen SLL, 2019c). För att göra elbussar ekonomiskt lönsamma är det viktigt att infrastrukturen utnyttjas effektivt. För linjer upp till 15 km långa som inte har för hög turtäthet kan ändhållplatsladdning vara ett lämpligt alternativ. Tekniker som innebär en låsning av linjer (laddning under färd eller hållplatsladdning) lämpar sig bäst för stomlinjer med hög passagerarkapacitet och som förväntas vara stabila över längre tid. Om flexibilitet är viktigast och inte 100 % eldrift är ett krav, är en kombination av depåladdade bussar och biogas-/biodiesel ett lämpligt alternativ. Ett sådant alternativ utnyttjar dock inte fullt fördelarna med minskat buller och utsläpp från elbussar då utsatta sträckor fortfarande kan trafikeras med konventionella bussar (Trafikförvaltningen SLL, 2017). Förarkostnaden står för nästan hälften av busstrafikens kostnad och det är därför viktigt att utreda vilka ändringar i omloppsschemat en teknik medför. Tilläggs-laddning kan resultera i längre omloppstider vilket innebär fler förartimmar medan depåladdning kan öka behovet av tomkörning (Trafikförvaltningen SLL, 2019c). Driftkostnad för elbussar beror av bussens energianvändning samt elpriset.

I Tabell 2 presenteras driftkostnader för två scenarier med låg respektive hög energianvändning (1,5 och 2,5 kWh/km). Elpriset är antaget till 0,9 kr/kWh för depå- och tilläggladdning och för laddning under färd är elen skattebefriad och är antagen till 0,6 kr/kWh (Trafikförvaltningen SLL, 2019c).

Tabell 2: *Sammanställning av kostnader för olika busstyperna.*

Teknik	Infrastruktur	Buss 18m [Mkr]	Bränslekostnader [kr/km]
Biodieselbuss	- *	3,4	5,46
Biogasbuss	- **	3,4	7,84
Depåladdning	0,25 Mkr/buss, Underhåll: 20 tkr/år	5,3	1,35 – 2,25
Tilläggladdning	3 – 4 Mkr/laddstation, Underhåll: 150 tkr/år	6,2	1,35 – 2,25
Laddning under färd	9 Mkr/km, Underhåll 100 tkr/km,år	7,2	0,9 – 1,5

* Den nödvändiga infrastrukturen (tankar och pumpar) är redan etablerad och medför därför ingen ytterligare kostnad.

** Kräver etablering av infrastruktur, speciellt om pipeline dras till depån. Kostnaden är okänd.

2.5 Batterier

Batteriet är en viktig komponent i elbussar och sätter begränsningar i hur bussen kan användas (Lindgren, 2015). Mängden energi som ett batteri kan leverera kallas för batteriets energikapacitet och uttrycks vanligen i kWh (Trafikförvaltningen SLL, 2019a). Batterier har lägre energidensitet än de konventionella drivmedel som används idag vilket innebär en stor utmaning då det begränsar bussens räckvidd. Li-jonbatterier är det vanligaste batteriet i elbussar och är ett kommersiellt tillgängligt och säkert alternativ. Det finns olika typer av Li-jonbatterier med olika egenskaper (Trafikförvaltningen SLL, 2019c). En viktig parameter är *C-rate*, vilket är ett mått på hur snabbt ett batteri kan laddas upp och ur utan att skadas. Ett batteri med 1 C-rate kan ladda upp/ur på en timme medan ett batteri med 5 C-rate kan ladda upp/ur på en femtedels timme (Trafikförvaltningen SLL, 2019a). Vid tilläggladdning är det vanligt med C-rate mellan 2 och 6 (Andersson, 2017).

Vid laddning av batterier talar man ofta om State of Charge (SOC) vilket är ett mått på hur mycket av batteriets kapacitet som finns kvar. SOC definieras enligt:

$$SOC(t) = \frac{cap(t)}{cap_{max}}, \quad (1)$$

där $cap(t)$ är energinivån i batteriet vid tiden t och cap_{max} är batteriets ursprungliga kapacitet (Franca, 2015). Ett fulladdat batteri har således 100 % SOC och ett tomt har 0 %.

Batteriets livslängd avgörs av dess kapacitetsdegradering, med vilket menas att med batteriets ålder minskar dess energilagringsskapacitet. Livslängden för ett Li-jonbatteri anses vara över när kapaciteten har sjunkit till 80 % av ursprungskapaciteten (Rogge m. fl., 2015). Kapacitetsdegradering är ett resultat av cykelåldring och kalenderåldring. Med cykelåldring menas att för varje cykel ett batteri går igenom minskar kapaciteten i batteriet.

Hur mycket kapaciteten minskar beror på hur djup urladdningen är. För batterier med högt C-rate blir kapacitetsdegraderingen större vid djupa urladdningar än för batterier med lågt C-rate. Kalenderåldring påverkas inte av hur batteriet används men dess inverkan på degraderingseffekten är temperaturberoende vilket gör det viktigt att effektivt kyla batterierna (Trafikförvaltningen SLL, 2019a). Slitage av batteriet ökar om det används vid tillfällen då det är fulladdat eller nästan urladdat. Att ladda upp till mer än 80 % av total kapacitet och djupa urladdningar (under 20 % SOC) bör därför undvikas (Lindgren, 2017), (Trafikförvaltningen SLL, 2019a). Framförallt gäller detta för batterier med högt C-rate. För att maximera batteriets livslängd, samt den totala energin som går genom batteriet under dess livstid, bör skillnaden mellan upp- och urladdning, det så kallade SOC-fönstret, hållas så litet som möjligt (Pihlatie m. fl., 2014). Det kan vara ekonomiskt lönsamt att ha större batterier än nödvändigt då de minskar slitaget och ökar livslängden (Lindgren, 2015).

Val av laddningsteknik avgör vilken typ av batteri som bör användas. För depåladdade bussar används energioptimerade batterier för att ge maximal räckvidd, medan för tilläggsaddade bussar används effektoptimerade batterier som klarar av att hantera höga laddningseffekter (Trafikförvaltningen SLL, 2019a). Vid tilläggsaddning laddas batteriet upp och ur många gånger per dag vilket gör att cykelåldringen har stor påverkan. Vid hög SOC måste laddströmmen begränsas för att inte överskrida spänningsbegränsningar i batteriet, en begränsning som ökar med batteriets ålder. Detta leder till längre laddtid vilket gör att hög SOC inte är önskvärt vid tilläggsaddning (Rogge m. fl., 2015). Batterierna i depåladdade bussar har en lägre C-rate, och degradering via cykelåldring är marginell (Trafikförvaltningen SLL, 2019a).

Det är svårt att prognostisera priserna för batterier då utvecklingen sker snabbt och när det gäller livslängd saknas det tillräcklig erfarenhet, men batteriet antas ofta behöva bytas inom 5 – 7 år (Trafikförvaltningen SLL, 2019c). I en utredning för elektrifiering av elbussar i Västerås räknar WSP med att effektoptimerade batterier kostar 14 000 kr/kWh (WSP, 2018a).

2.6 Nätanslutning

För att kunna ladda en buss krävs det en anslutning till elnätet. Anslutningen till elnätet görs i nätstationer och det är viktigt att effektuttaget inte överstiger begränsningarna i nätstationen. Begränsningarna i en nätstation ges i skenbar effekt, vilket inkluderar både reaktiv och aktiv effekt. På grund av att laddstationer har en effektfaktor nära 1 blir effektuttaget nästan enbart i aktiv effekt [W] (Karlsson, 2016). Anslutningen kan göras antingen till lågspänningsnätet (0.4 kV) eller mellanspänningsnätet (11 eller 22 kV) och kostnaden beror på vilken huvudsäkring som krävs. Huvudsäkringen dimensioneras efter den ström som uppstår vid önskat effektuttag vid en viss spänning. Sambandet mellan ström, spänning och effekt för ett trefassystem beskrivs enligt:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} * U}, \quad (2)$$

där I är strömmen, P är effekten och U är spänningen.

I Tabell 3 presenteras anslutningskostnaden för olika effektnivåer vid anslutning till lågspänningsnätet enligt Vattenfalls schablonpriser (Vattenfall, 2019). Utöver kostnad för abonnemang kommer kostnad för att dra kabel från nätstationen till laddstationen. Om det inte finns plats för anslutning i den befintliga nätstationen krävs att en ny byggs, bekostad av nätägaren.

Tabell 3: *Kostnad för olika effektuttag vid anslutning till lågspänningsnätet.*

Effekt [kW]	Huvudsäkring [A]	Kostnad [SEK]
200	290	140 000
300	435	240 000
400	580	340 000
500	730	340 000
600	870	450 000

Till följd av förluster i laddstationen och i batteriet bör man räkna med att effektbehovet från elnätet är cirka 15 % högre än det som lagras i batteriet⁸. Effektbehovet från en elbuss beräknas genom att se på vilken laddeffekt den klarar av. Batteriet klarar av att laddas med hög effekt i början, sedan rampas laddeffekten ned för att minska slitage. Ibland uttrycks laddeffekten som en snitteffekt vilket är snitteffekten över hela laddningstiden⁹. För en laddstation med 600 kVA inklusive kabeldragning uppskattade WSP (WSP, 2018a) en kostnad till cirka 500 000 kr.

⁸Personlig kontakt, Joakim Nyman, Senior researcher, RISE Viktoria, 26/4 2019

⁹Personlig kontakt, Elias De faire, Elkraftsingenjör WSP, 12/2 2019

2.7 Elbussprojekt

Det finns redan ett antal städer i Sverige som har elbussar i trafik. Eskilstuna har en bussflotta om 84 bussar varav 12 är helelektriska och laddas vid depån. De två första elbussarna togs i trafik 2015 och 2017 skedde en utökning med 10 bussar. Laddtiden är cirka 4-6 timmar beroende på hur många bussar som laddas samtidigt. Bussarna värms med tilläggsvärmare. Om uppvärmning sker med el skulle det innebära att bussens räckvidd halveras¹⁰.

Umeå var tidiga med att använda sig av tilläggladdning med hög effekt och har sedan 2016 två stadsbusslinjer med helelektriska bussar med laddning vid ändhållplatserna. Den ena är 15 km lång enkel väg och bussen laddas med 650 kW i tre minuter. Laddningen ger bussen tillräckligt med energi för att åka linjen fram och tillbaka. Till följd av den höga effekten vid laddstationerna har de haft problem med spänningsfall i nätet i bostadsområden kring laddstationerna. Detta åtgärdades med ett energilager för att minska effekttopparna (WSP, 2016). Flottan planeras att utökas med ytterligare 25 elbussar, vilket skulle innebära att 50% av bussarna är elbussar (SVT, 2019).

ElectriCity-projektet i Göteborg innefattar elektrifiering av en busslinje som går genom centrala Göteborg. Linjen är drygt 7,5 km lång enkel väg, och trafikeras av tre helelektriska bussar och sju elhybrider. Laddning sker med pantograf vid ändhållplatserna i cirka 3-4 minuter och ger bussen tillräckligt med energi för att köra 20 km. Bussarna långsamladdas även i depån i cirka 4 timmar under natten (ElectriCity, 2016).

I december 2018 togs de första helelektriska bussarna i Malmö i trafik på en linje som är knappt 15 km lång och där laddning sker vid ändhållplatserna (Malmö stad, 2018), (Malmö stad, 2019). Linjen kommer att trafikeras med 13 bussar och laddning sker via pantograf som tar cirka fem minuter (Nobina, 2018).

I Barcelona trafikeras en linje med två helelektriska ledbussar. Linjen är drygt 12 km lång, enkel väg, och laddning sker med 400 kW vid en av ändhållplatserna och tar cirka 6-8 minuter. För att underhålla batteriet långsamladdas de även i depån med 50 kW. Bussens energianvändning är i snitt 2,2 kWh/km och batteriet är på 125 kWh (ZeEus, 2017). Projektet i Barcelona är intressant då det är ovanligt med tilläggladdning av 18-meters ledbussar i Sverige, vilket är den typ av buss som är aktuell i Uppsala.

¹⁰Personlig kontakt, Mathias Hjelte, Affärsutvecklare, Sörmlandstrafiken, 22/3 2019.

3 Metod

Detta kapitel presenterar vilka metoder som har använts i studien och vilka beräkningar som har utförts. Flera metoder har använts för att svara på frågeställningarna. Avsnitt 3.1 och 3.2 beskriver de kontakter och platsbesök som gjorts i studien. Avsnitt 3.4 beskriver vilka beräkningar som görs i modellen.

Det övergripande syftet med detta arbete var att undersöka alternativ till att ladda elbussar vid depån då detta var problematiskt under rådande kapacitetsbegränsning. Arbetet började därför med en litteraturstudie där information samlades in om olika alternativ till depåladdning (se avsnitt 2.4). Informationsinsamlingen inkluderade samtal med relevanta aktörer för att få utökad förståelse för problematiken kring de olika alternativa laddningsteknikerna. Platsbesök gjordes i Eskilstuna och Göteborg där elbussar redan är i drift. För att undersöka vilka krav busstrafiken ställer på laddningsinfrastrukturen togs en beräkningsmodell fram.

3.1 Personlig kontakt

Under studien har flera aktörer kontaktats för att samla in information. UL och GUB kontaktades för att få bättre förståelse för busstrafiken i Uppsala samt hur elbussar ska implementeras. Sweco, RISE, Sörmlandstrafiken och ElectriCity-projektet (se avsnitt 2.7) kontaktades för att ta del av deras erfarenheter från tidigare och pågående elbussprojekt. I Tabell 4 presenteras kontakterna och i vilket syfte de kontaktades.

Tabell 4: *Personlig kontakt under studien.*

Organisation	Person	Datum	Syfte
Region Uppsala	Marcus Nystrand	21/1/2019	Problembeskrivning och bakgrund
Kollektivförvaltningen UL	Dennis Solid	12/2/2019	ULs framtidsbild av stadsbussarna
Gamla Uppsala Buss	Tommy Rydbeck	15/2/2019	Utökad förståelse för busstrafiken
Sweco	Maria Xylia, Anton Sjögren	22/2/2019	Erfarenheter från andra projekt
Sörmlandstrafiken	Mathias Hjelte	22/3/2019	Erfarenheter från elbussarna i Eskilstuna
FerroAmp	Mats Karlström	1/4/2019	Expertis inom batterier
RISE Viktoria	Joakim Nyman	26/4/2019	Forskare inom elbussar
ElectriCity	Gunnar Ohlin	26/4/2019	Projektledare för ElectriCity projektet i Göteborg.

3.2 Platsbesök

Ett platsbesök gjordes i Eskilstuna vid deras bussdepå där de har elva depåladdade elbussar i drift sedan 2017. Besöket i Eskilstuna gav möjlighet att lära från erfarenheter de haft med elbussar och vilka skillnader mot konventionella bussar de har upplevt.

Ett platsbesök gjordes i Göteborg för att närmare studera en linje som laddas med ändhållplatsladdning. Besöket inkluderade ett möte med RISE Viktoria samt ett möte med en projektledare för ElektriCity och arbetet med elbusslinjen. RISE Viktoria har tagit fram en modell för dimensionering av elbussar, placering av infrastruktur samt kostnadskalkyl för hela systemet (Nyman m. fl., 2017).

3.3 Val av teknik

Av de tekniker som presenterades i avsnitt 2.4 valdes tilläggs-laddning vid ändhållplatser som den teknik som skulle undersökas vidare. Valet gjordes efter samtal med Region Uppsala, GUB och UL som presenterade både önskemål och problematik med avseende på elektrifiering¹¹¹²¹³.

För att bäst dra fördel av de minskade utsläpp och bullernivåer som elbussar medför, ska de trafikera centrum där utsläpp och buller är som högst. Då elbussar är dyrare vid inköp än konventionella bussar men billigare i drift är det viktigt att elbussarna har en hög utnyttjandegrad för att kunna 'köra in' den extra investeringskostnaden. Bussflottans flexibilitet bör inte inskränkas då detta kan innebära att fler antal bussar krävs, något som GUB ville undvika. Tråddrift valdes bort av flera anledningar. Det skulle innebära stora kostnader i infrastruktur, göra stort intrång i gaturummet samt låsa bussar till specifika linjer. Då UL vill att elbussarna ska gå igenom centrum innebär det att nödvändig infrastruktur måste installeras i redan trånga gatuutrymmen, vilket skulle bli problematiskt.

Då återstod tilläggs-laddning, antingen vid knutpunkter eller vid ändhållplatser där laddning kan ske antingen induktivt eller konduktivt. Induktiv laddning valdes bort på grund av den låga tekniska mognadsgraden. Fördelen med laddning vid nyckelhållplatser är att infrastrukturen då kan delas av många linjer och antalet laddstationer minimeras. Däremot kräver det att det finns tillräckligt många laddstationer för att inte skapa kö, och sannolikheten att flera bussar behöver ladda samtidigt är hög. Med avseende på det begränsade utrymmet vid knutpunkter, till exempel Centralstationen, samt kapacitetsbristen ansågs detta inte lämpligt. UL gjorde en utredning kring ändhållplatsladdning och kom fram till att det var en lämplig teknik för linje 6 och 8 (UL, 2017).

¹¹Personlig kontakt med Tommy Rydbeck, Gamla Uppsala Buss (15/2 2019)

¹²Personlig kontakt, Dennis Solid, UL, (12/2 2019)

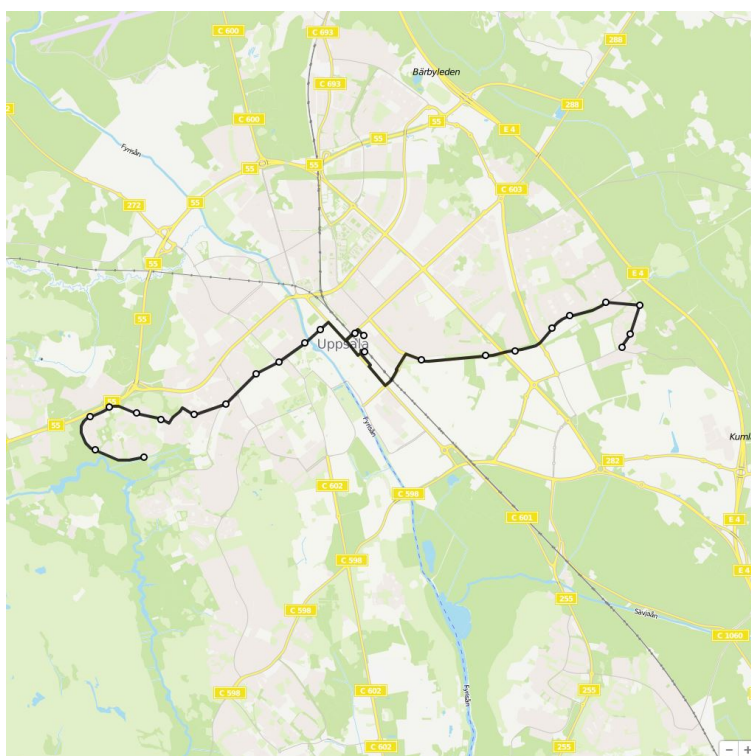
¹³Personlig kontakt, Marcus Nystrand, Region Uppsala (löpande våren 2019).

Av de tekniker som presenterades i avsnitt 2.4 var pantografer vid ändhållplatser den teknik som passade Uppsala bäst. I Tabell 5 presenteras en sammanställning av de olika teknikerna med en kort motivering till varför de valdes bort.

Tabell 5: *Motivering till exkludering av ett antal tekniska lösningar.*

Teknik	Motivering
Tråddrift	Stor påverkan på gaturummet och dyr infrastruktur
Elskena	Dyr infrastruktur samt låg teknisk mognadsgrad.
Induktion	Dyr infrastruktur samt låg teknisk mognadsgrad
Snabbladdning vid knutpunkter	Trångt i centrum samt kapacitetsbrist

Linje 6 går från Sävesvägen i Flogsta till Södra Slavstavägen i Slavsta, se Figur 1, och är 11 km lång, enkel väg. Linje 8 går från Garnisonen i Ärna till Lärkvägen i Sunnersta, se Figur 2, och är 15 km lång, enkel väg.



Figur 1: Karta över Uppsala där linje 6, som går mellan Flogsta och Slavsta, är markerad. (<https://moovitapp.com>).



Figur 2: Karta över Uppsala där linje 8, som går mellan Ärna och Sunnersta, är markerad. (<https://moovitapp.com>).

3.4 Beräkningsmodell

Syftet med denna studie var att utreda vilka krav busstrafiken ställer på dimensioneringen av en trafiklösning med elbussar där laddning sker utanför depån. Tilläggs-laddning vid ändhållplatser var den mest lämpliga tekniken och arbetet fokuserades mot dimensionering av en sådan lösning. Tidigare studier har utgått från de krav som kommer från busstrafiken och ett 'worst case' scenario med avseende på energianvändning för att dimensionera systemet (Beekman och van den Hoed, 2016), (Xylia, 2018). Tidigare studier har även antagit att alla bussarna som kör en linje ska klara av att köra alla omlopp, därför bör dimensionering ske efter den 'värsta' omloppet (Rogge m.fl., 2015). Detta antagande har bekräftats i samtal med GUB och Region Uppsala¹⁴. Faktorer som påverkar dimensioneringen är tiden tillgänglig för laddning, effekten vid laddning och energianvändningen i bussen. Den största osäkerheten ligger i antagandet kring bussens specifika energianvändning. Tidigare studier varierar i sina antaganden, (Beekman och van den Hoed, 2016) har antagit 2 kWh/km (inklusive uppvärmning) för en 12-meters buss och 3 kWh/km (inklusive uppvärmning) för en 18-meters buss. Andersson (2017) räknar med en maximal specifik energianvändning om 1,6 kWh/km för en 12-meters buss och 2,3 kWh/km för en 18-meters buss. Rogge m.fl. (2015) visade att 18-meters bussar använde 1,79-2,19 kWh/km med snitt 1,96 kWh/km i framdrift och om övrig elektronik lades till (styrsystem, luftkonditionering etc) ökade det till 2,26-2,69 kWh/km. Om uppvärmning sker med elenergi kan det dubbla den totala energianvändningen. Rogge m.fl. (2015) och Lindgren (2017) räknar med 2 kWh/km för en 18-meters buss exklusive uppvärmning.

Hösten 2017 gjordes en utredning av UL (UL, 2017) som undersökte möjligheterna till ändhållplatsladdning i Uppsala. I utredningen togs ett flertal krav fram som en busslinje bör uppfylla för att anses lämplig för ändhållplatsladdning. Dessa inkluderade bland annat att:

- avståndet mellan laddstationerna ska vara kortare än 15 km,
- linjen ska trafikera Uppsalas innerstad,
- och ändhållplatserna ska vara stabila över tid, det vill säga att ändhållplatserna inte förväntas flyttas.

Utfallet av utredningen blev att linje 6 och linje 8 ansågs vara lämpliga linjer att elektrifiera med ändhållplatsladdning. Den visade att det var den totala energianvändningen för en sträcka på linjen som var intressant för att dimensionera batteriets storlek. Under utredningen hade UL samtal med Vattenfall Eldistribution och det fanns då plats för anslutning i tre av de fyra nätstationerna som ligger i närheten av ändhållplatserna. Vid ändhållplatsen i Flogsta var nätstationen full och det skulle krävas en ny station. Uppskattad engångsavgift för en anslutning som klarar av att leverera 300 kW är 240 000 kr. I utredningen konstateras att det inte finns några större hinder för elektrifiering av linje 6 eller linje 8 med ändhållplatsladdning (UL, 2017). Med denna undersökning som grund fokuserades arbetet på ändhållplatsladdning av linje 6 och linje 8 samt lämplig

¹⁴Personlig kontakt med Tommy Rydbeck, Gamla Uppsala Buss (15/2 2019), Marcus Nystrand, Region Uppsala, (löpande våren 2019).

dimensionering av batteri och effektbehov vid laddstationen.

I beräkningsmodellen antas den specifika energianvändningen för bussen vara konstant per körd sträcka. I verkligheten varierar energianvändningen under sträckan beroende på bland annat lutning och acceleration (Sinhubera m.fl., 2012). Tidigare studier har använt samma antagande och en uppskattad tid för laddning för att beräkna bussens energianvändning (Karlsson, 2016). Denna approximation har därför ansetts godtagbar och varit grunden i denna modell. Genom att anta en konstant energianvändning som endast beror av den körda sträckan kan modellen beräkna energin i bussens batteri under körning utifrån information om linjens längd. Det ska tilläggas att denna energianvändning endast gäller framdrivning av bussen; uppvärmning antas ske med bränslevärmare. Skulle uppvärmning ske via elenergi kan bussens energianvändning fördubblas en kall vinterdag.

För att underlätta tolkningen av resultaten omvandlas batteriets energi till procent av batteriets totala kapacitet. Detta kallas för 'State of charge' och kommer i fortsättningen förkortas (SOC). Omvandling till SOC gör det enkelt att avgöra den tillgängliga energinivån i batteriet oavsett storlek. För effekt-optimerade batterier är det så kallade SOC-fönstret typiskt 20-80 % (se avsnitt 2.5) inom vilket batterinivån bör hållas. Detta har satts som begränsningar i modellen för hur mycket energi som finns tillgänglig i batteriet. Det innebär att bussen endast har tillgång till 60 % av den totala batterikapaciteten, även efter fulladdning (alltså 80 % SOC). Batterinivån när bussen ankommer till hållplatsen beskrivs av följande formel:

$$E_{h,a} = E_{h-1,l} - E_s * S, \quad (3)$$

där $E_{h,a}$ är batterinivån [kWh] när bussen ankommer till hållplatsen, $E_{h-1,l}$ är batterinivån [kWh] när bussen lämnar hållplatsen, E_s är bussens specifika energianvändning [kWh/km] och S är den körda sträckan [km]. Bokstaven h representerar vilken hållplats bussen är vid där $h = 1$ är första hållplatsen på omloppet. När bussen når en ändhållplats simuleras laddning genom att addera energi till den befintliga energinivån i batteriet. Hur mycket energi som adderas beror på vilken effekt som har angivits vid laddstationen samt under hur lång tid laddningen sker. Den nya batterinivån beräknas enligt (4) och begränsas till att endast ladda upp till 80% av den totala batterikapaciteten.

$$E_{h,l} = \min\{E_{h,a} + t * P, 0.8 * B\}, \quad (4)$$

där $E_{h,l}$ är energinivån i batteriet [kWh] när den lämnar hållplatsen, t är tiden tillgänglig för laddning [min], P är effekten vid laddningsstationen [kW] och E_B är batteriets totala kapacitet [kWh]. Omvandling till SOC av den tillgängliga energin i batteriet görs enligt (5).

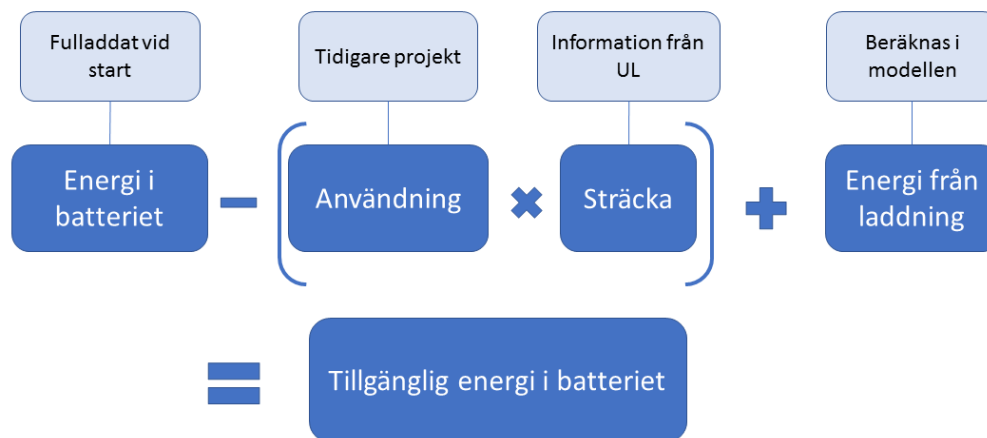
$$SOC = 100 * \frac{E_{h,l}}{E_B}, \quad (5)$$

där SOC är batteriets energinivå uttryckt i procent av den totala batterikapaciteten..

3.4.1 Dimensionering

Då flexibilitet i bussflottan är en viktig förutsättning för bussoperatören bör alla bussar kunna köra den mest krävande turen på linjen. Dimensionering av bussens batteri och infrastrukturen bestäms därmed av den mest krävande turen på linjen. Den tur som blev dimensionerande bestämdes genom att analysera SOC för alla turerna och identifiera den som ställde högst krav. När den mest krävande turen identifierats togs ett 'worst case' - scenario fram för att bestämma vilka krav dagens busstrafik ställer på tekniken. I det scenariot använder bussen 3 kWh/km till framdrift och effekten vid laddstationerna är satt till 300 kW, vilken är den lägsta som anses rimlig vid snabbbladdning. En tumregel vid dimensionering av batteriet i elbussar är att det bör finnas tillräcklig kapacitet för att klara av en missad laddning¹⁵. För att modellen ska representera ett 'worst case' har den mest kritiska laddningen missats. Den laddning som är mest kritisk har valts utifrån bussens SOC vid ankomst till ändhållplatsen. Det tillfället då bussen har lägst SOC har antagits vara den mest kritiska laddningen. Om det är flera tillfällen där bussen ankommer med samma SOC valdes det tillfället med längst laddtid. För att säkerställa att ett 'worst case' har identifierats simulerades missad laddning för laddningstillfällen med de tre lägsta SOC vid bussens ankomst. Dessa har benämnts 'Lägsta SOC', 'Näst lägsta SOC' och 'Tredje lägsta SOC' i avsnitt 4.

Att testa de tre mest kritiska laddningarna har flera syften. För det första ger det en uppfattning om huruvida det är ett enstaka laddningstillfälle som är dimensionerande för turen. Dessutom är det inte säkert att det tillfället då bussen har lägst SOC representerar den mest kritiska laddningen. Med denna metod maximeras chansen att hitta ett 'worst case'- scenario och den minsta batteristorleken har kunnat tas fram för att klara av att köra enligt dagens turschema och missa den mest kritiska laddningen. I Figur 3 presenteras en schematisk bild över hur beräkningsmodellen räknar ut den tillgängliga energin i batteriet efter varje körd kilometer. Utöver missad laddning gjordes även simuleringar för scenarier där bussen har kortare laddtid eller att omloppsschemat görs om för att ge möjlighet för laddning.



Figur 3: Schematisk bild över beräkningsmodellen.

¹⁵Maria Xylia, PhD, Konsult Energy Strategies, Sweco. 21/2 2019.

I Tabell 6 presenteras de scenarier som har studerats och varför de är relevanta. I scenarierna med minskad laddtid förkortades helt enkelt reglertiden i omloppsschemat med en, två och tre minuter. I stödladdning-scenariot förlängdes ett laddningstillfälle tills batteriet hann ladda upp till 80 % SOC. Garanterad laddtid innebär att bussen, vid varje laddningstillfälle, gavs minst fyra minuter laddtid.

Tabell 6: *Scenarier som har testats med beräkningsmodellen.*

Scenario	Syfte
Missad laddning	Bussen bör klara av att missa en laddning och fortsätta sin omlopp.
Minskad tid för laddning	Det är osannolikt att all reglertid kan användas till laddning då den ska reglera för eventuella förseningar samt att det tar tid att starta laddningen.
Stödladdning	En möjlig lösning är att ge bussen enstaka tillfällen för att kunna ladda mer.
Garanterad laddtid	Tid för full laddning kan ges vid varje laddningstillfälle.

3.5 Data

Data från UL:s omloppsscheman har varit centrala i beräkningsmodellen. Från dessa har information om alla omlopp samt reglertider hämtats vilket har möjliggjort att simulera vilka krav dagens busstrafik ställer. Omloppsschemat beskriver alla omlopp som finns på en linje samt vilken typ av buss som används och benämns med ett nummer, till exempel 607, vilket innebär att det är omlopp 7 på linje 6. Omloppen trafikeras inte av en specifik buss utan det bestäms beroende på vilken buss som är tillgänglig den dagen.

Det finns även olika typer av omlopp, där stomtrafik går med hög turtäthet och under stora delar av dygnet. I rusningstid krävs dock fler bussar och då kompletteras stomtrafiken med ytterligare fordon under en kortare tid. Hur fördelningen mellan de olika omloppen ser ut presenteras i Tabell 7. Det är stor skillnad i hur omloppen ser ut på vardagar jämfört med helger. På vardagar trafikeras linje 6 av sammanlagt 12 omlopp, där fem omlopp kör från morgon till kväll, fyra omlopp kör eftermiddag till kväll och tre omlopp endast kör på förmiddagen. Linje 8 trafikeras på vardagar av 15 omlopp med sju heldagsomlopp samt fyra omlopp på både förmiddagen och eftermiddagen.

Tabell 7: Antal omlopp och hur de är schemalagda för linje 6 samt linje 8.

Linje	Dag	Antal omlopp	Heldag	Förmiddag	Eftermiddag
6	Vardag	12	5	3	4
6	Lördag	4	4	0	0
6	Söndag	4	4	0	0
8	Vardag	15	7	4	4
8	Lördag	5	5	0	0
8	Söndag	5	5	0	0

4 Resultat

I detta kapitel presenteras resultatet av de simuleringar som gjorts med hjälp av beräkningsmodellen. I avsnitt 4.1 presenteras information om linje 6 respektive 8 samt resultaten från de scenarier som beskrivits i avsnitt 3. För att få utökad förståelse för vad som var dimensionerande utfördes även känslighetsanalyser. I avsnitt 4.2 presenteras resultaten från känslighetsanalysen. I avsnitt 4.2.1 förkortas laddningstiden från den nuvarande reglertiden, i avsnitt 4.2.2 läggs ett stödladdningstillfälle till och i avsnitt 4.2.3 garanteras laddtid vid varje laddningstillfälle.

4.1 Dimensionering

Omlopp 607 och omlopp 808 identifierades som de dimensionerande omlopp under vardagar på linje 6, respektive linje 8. Dessa omlopp har sedan använts vid test av olika scenarier som kan uppstå och för att se vilken storlek på batteri som är nödvändig. Först skapades ett grundfall med vilket andra scenarier kunde jämföras. I grundfallscenariot används all den schemalagda reglertiden till laddning av bussen, vilket förutsätter att bussen varken är försenad eller att tid förloras för att påbörja och avsluta laddningen. De scenarier då bussen missar en laddning är, förutom den missade laddningen, identiska med grundfallet. I Tabell 8 och 9 presenteras resultaten för grundfallet samt scenarier med en missad laddning för omlopp 607, respektive 808 en vardag. Som tidigare nämnts menas med 'Lägsta SOC' att det laddningstillfälle då bussen ankommer till en ändhållplats med lägst batterinivå missas. 'Näst lägsta SOC' och 'Tredje lägsta SOC' definierats på liknande sätt. Tabell 8 och 9 visar att med en ökande laddeffekt minskar storleken på batteriet, även när ett laddningstillfälle utgår. Värt att påpeka är att det inte nödvändigtvis är samma laddningstillfälle som missats för de olika laddeffekterna utan då SOC är som lägst. Därför skiljer det sig i antal minuter missad laddning mellan de olika laddningseffekterna. Detta antyder att de situationer som är dimensionerande för laddning med 300 kW inte nödvändigtvis är dimensionerande för 500 kW.

Tabell 8: *Scenarier för omlopp 607 en vardag där bussen går enligt dagens omloppsschema samt missar ett laddningstillfälle.*

Scenario	Laddning [kW]	Missad laddning [Min]	Batteristorlek [kWh]
Grundfall	300	Ingen	160
Lägsta SOC	300	15	220
Näst lägsta SOC	300	6	210
Tredje lägsta SOC	300	6	210
Grundfall	400	Ingen	100
Lägsta SOC	400	7	150
Näst lägsta SOC	400	4	140
Tredje lägsta SOC	400	5	130
Grundfall	500	Ingen	80
Lägsta SOC	500	4	150
Näst lägsta SOC	500	7	140
Tredje lägsta SOC	500	2	110

Tabell 9: *Scenarier för omlopp 808 en vardag där bussen går enligt dagens omloppsschema samt missar ett laddningstillfälle.*

Scenario	Laddning [kW]	Missad laddning [Min]	Batteristorlek [kWh]
Grundfall	300	Ingen	150
Lägst SOC	300	14	260
Näst lägst SOC	300	14	220
Tredje lägst SOC	300	6	200
Grundfall	400	Ingen	100
Lägst SOC	400	11	180
Näst lägst SOC	400	14	190
Tredje lägst SOC	400	7	180
Grundfall	500	Ingen	90
Lägst SOC	500	11	170
Näst lägst SOC	500	7	150
Tredje lägst SOC	500	14	150

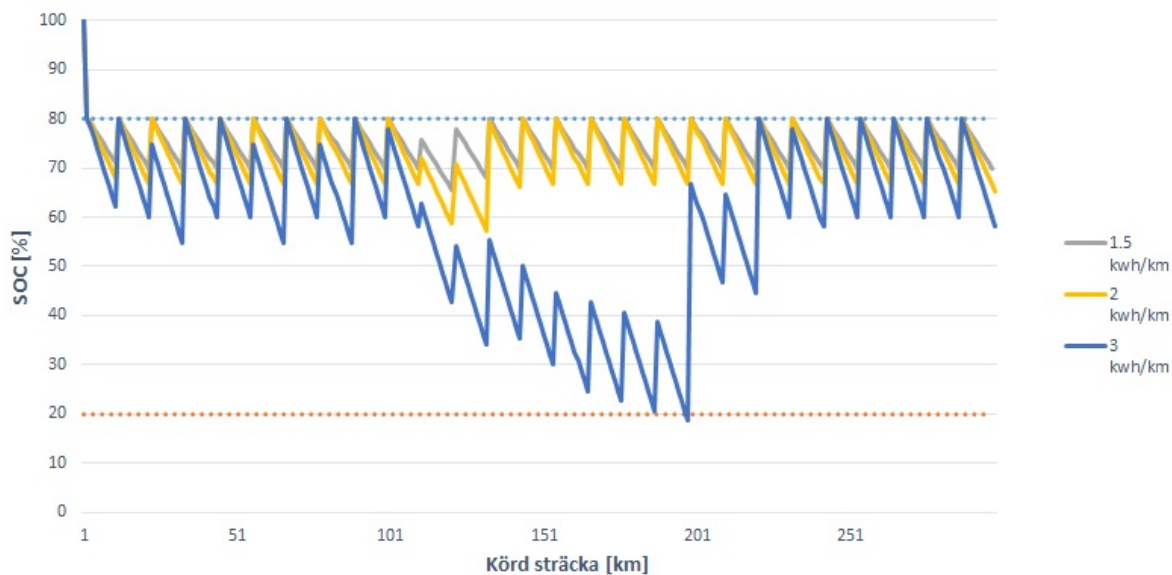
I Tabell 10 presenteras information om reglertiden för de dimensionerande omloppen för de respektive linjerna och dagarna. Värt att notera är att trots att trafiken är glesare på helger innebär minskningen av antal omlopp att medeltiden för reglertiden är lägre än under vardagarna. Tiden nödvändig för laddning är beroende av både bussens energianvändning och vilken effekt som använts vid laddning. I Tabell 11 presenteras tiden det tar att ladda energin som är nödvändig för att köra sträckan i scenarier med olika energianvändning och olika effekt vid laddningen. Tiden presenteras i hela minuter och har avrundats uppåt för att vara på den säkra sidan. SOC för de olika energianvändningsscenarierna illustreras i Figur 4 och i Figur 5 där laddning sker med 300 kW och SOC-fönster för ett 150 kWh batteri är markerat. Figur 4 visar SOC för en buss som kör tur 607 en vardag och Figur 5 visar SOC för en buss som kör tur 808 en vardag. Både Figur 4 och Figur 5 visar tydligt att en energianvändning om 3 kWh/km ställer betydligt högre krav än de andra två fallen.

Tabell 10: *Information om reglertider för de dimensionerande omloppen på linje 6, respektive 8 presenterat i minuter.*

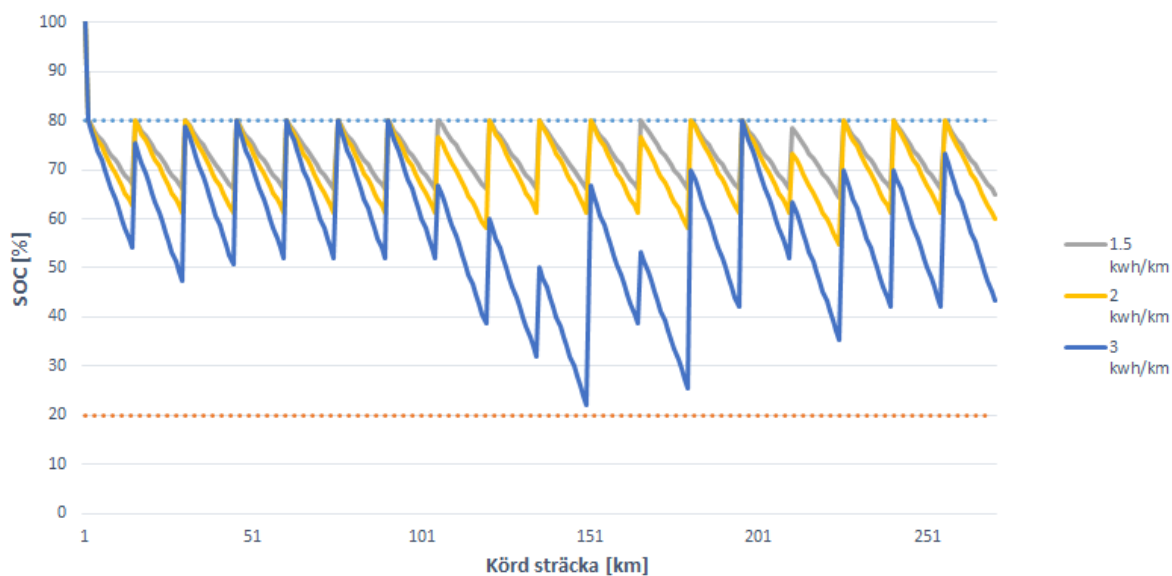
omlopp	Total [min]	Längst [min]	Kortast [min]	Medeltid [min]	Standardavvikelse [min]
607 Vardag	233	19	2	8.6	4.5
604 Lördag	93	9	4	5.8	1.6
601 Söndag	125	18	4	7.0	3.9
808 Vardag	157	14	4	9.2	3.0
804 Lördag	134	15	3	6.7	2.7
804 Söndag	134	15	3	7	3

Tabell 11: *Tid nödvändig för fullständig laddning för linje 6, respektive linje 8 med varierande laddeffekt och energianvändning.*

Energianvändning [kWh/km]	Laddeffekt [kW]	Linje 6 [min]	Linje 8 [min]
1,5	300	4	5
1,5	400	3	4
1,5	500	2	3
2	300	5	6
2	400	4	5
2	500	3	4
3	300	7	9
3	400	5	7
3	500	4	6



Figur 4: Grafen visar SOC för en buss som kör omlopp 607 enligt omloppsschemat och där all schema-lagd reglertid är tillgänglig för laddning. Laddning sker med 300 kW. De streckade linjerna markerar SOC-fönstret (20–80 %) för ett batteri på 150 kWh. De heldragna linjerna representerar bussens spe-cifika energianvändning om 1,5, 2 respektive 3 kWh/km.



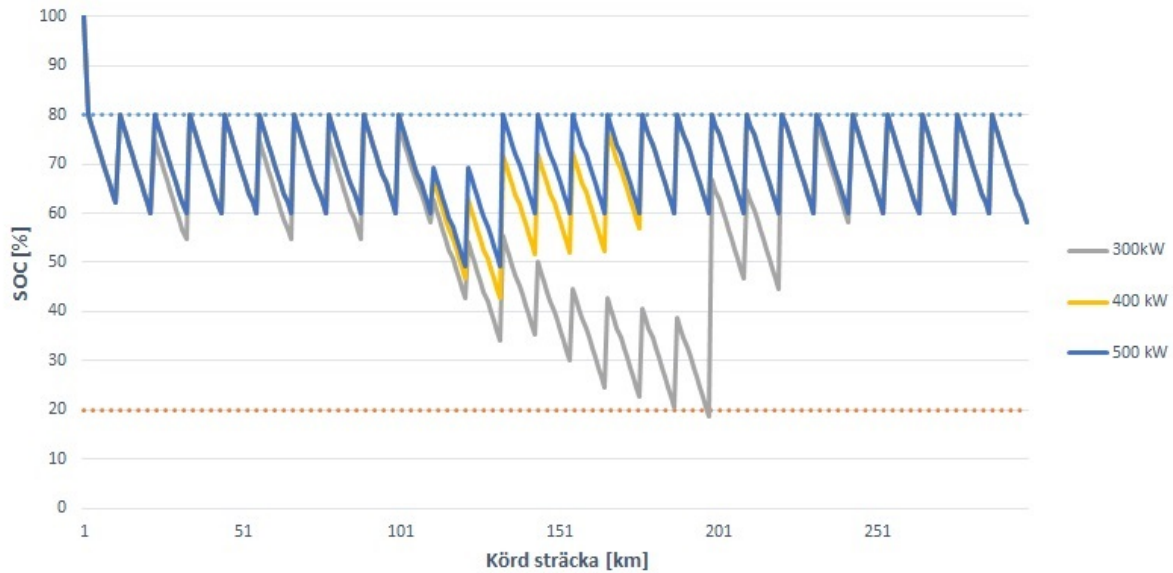
Figur 5: Grafen visar SOC för en buss som kör omlopp 808 en vardag enligt det befintliga omlopps-schemat och där all schemalagd reglertid är tillgänglig för laddning. Laddning sker med 300 kW. De streckade linjerna markerar SOC-fönstret (20–80 %) för ett batteri på 150 kWh. De heldragna linjerna representerar bussens specifika energianvändning om 1,5, 2 respektive 3 kWh/km.

Då omloppsschemat ändras för helgdagar är det inte samma omlopp som är dimensionerande. För linje 6 var det omlopp 604 som var dimensionerande på lördagar och 601 på söndagar. För linje 8 var omlopp 804 dimensionerande för både lördag och söndag. I Tabell 12 presenteras resultaten för de dimensionerande omlopp för linje 6 och linje 8 en lördag, respektive en söndag. Under lördagar och söndagar är det färre bussar i omlopp vilket gör att bussarna inte har lika många tillfällen med längre reglertid som på vardagar. Detta påverkar framförallt scenarier med 300 kW laddeffekt. Reglertiden är aldrig kortare än fyra minuter, vilket gör att med en högre laddeffekt hinner bussen ladda upp batteriet bättre än under vardagarna. Se avsnitt 3.5 för mer information om reglertiderna.

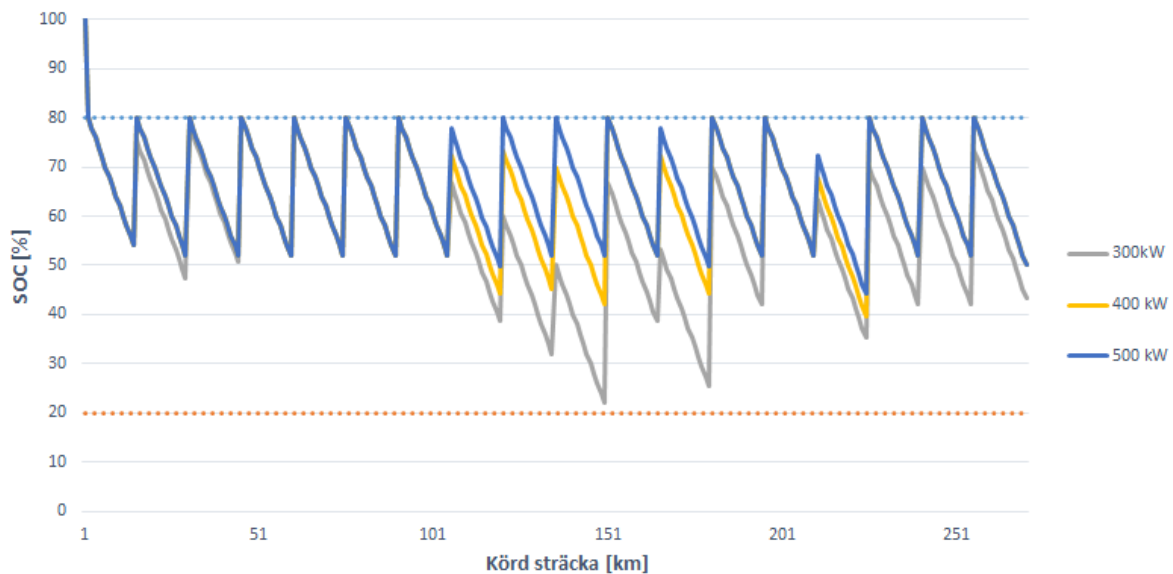
Tabell 12: *Dimensionerande batteristorlekar för omlopp på linje 6 och linje 8 under helgdagar.*

Omlopp/Dag	Laddning [kW]	Missad laddning [min]	Batteristorlek [kWh]
604 - Lördag	300	7	250
604 - Lördag	400	5	140
604 - Lördag	500	5	110
601 - Söndag	300	7	260
601 - Söndag	400	9	150
601 - Söndag	500	9	110
804 - Lördag	300	8	570
804 - Lördag	400	8	290
804 - Lördag	500	7	180
804 - Söndag	300	8	580
804 - Söndag	400	8	290
804 - Söndag	500	5	190

I Figur 6 presenteras SOC i grundfallet för omlopp 607 en vardag med olika laddeffekt vid ändhållplatserna. I detta scenario använder bussen 3 kWh/km till framdrift och det markerade SOC-fönstret gäller för ett batteri med 150 kWh. I grundfallet med 300 kW laddeffekt krävs ett batteri med 160 kWh för att klara omloppet, vilket är dubbelt så stort som för grundfallet med 500 kW laddeffekt. I detta scenario går bussen helt enligt UL:s omloppsschema och all den reglertid som finns vid ändhållplatserna antas vara tillgänglig för laddning. Minskningen i SOC som sker vid 100 km är resultatet av ett laddningstillfälle om två minuter, vilket inte är tillräckligt för att ta igen den senaste körningen. Med 400 och 500 kW laddeffekt kan bussen snabbt återhämta den missade laddningen inom den schemalagda reglertiden. Med 300 kW laddeffekt faller istället SOC stadigt från 100 km till 200 km tills ett tillfälle med 19 minuters reglertid gör det möjligt för bussen att återhämta sig från det korta laddningstillfället. På grund av att laddtiden är kortare än sju minuter fortsätter SOC falla för scenariot med 300 kW laddeffekt, medan scenarierna med högre laddeffekt klarar av att återhämta den korta laddningen.

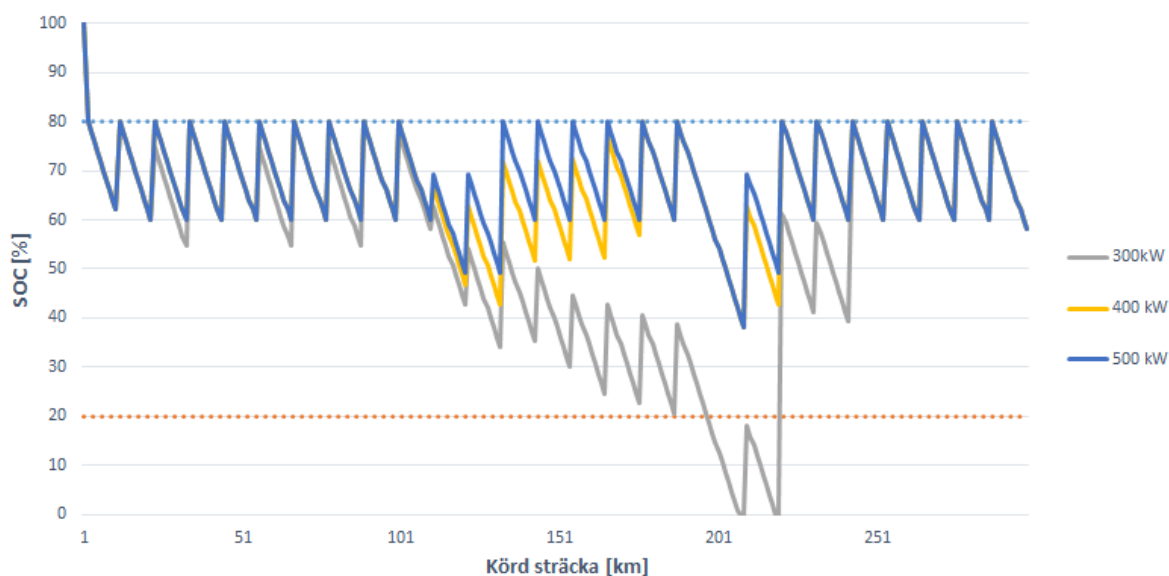


Figur 6: Grafen illustrerar SOC för en buss som kör omlopp 607 en vardag med olika laddningseffekter vid ändhållplatserna. Bussens specifika energianvändning är 3 kWh/km och de streckade linjerna markerar SOC-fönstret (20–80 %) för ett batteri med 150 kWh. De heldragna linjerna representerar laddningseffekt om 300, 400, respektive 500 kW.

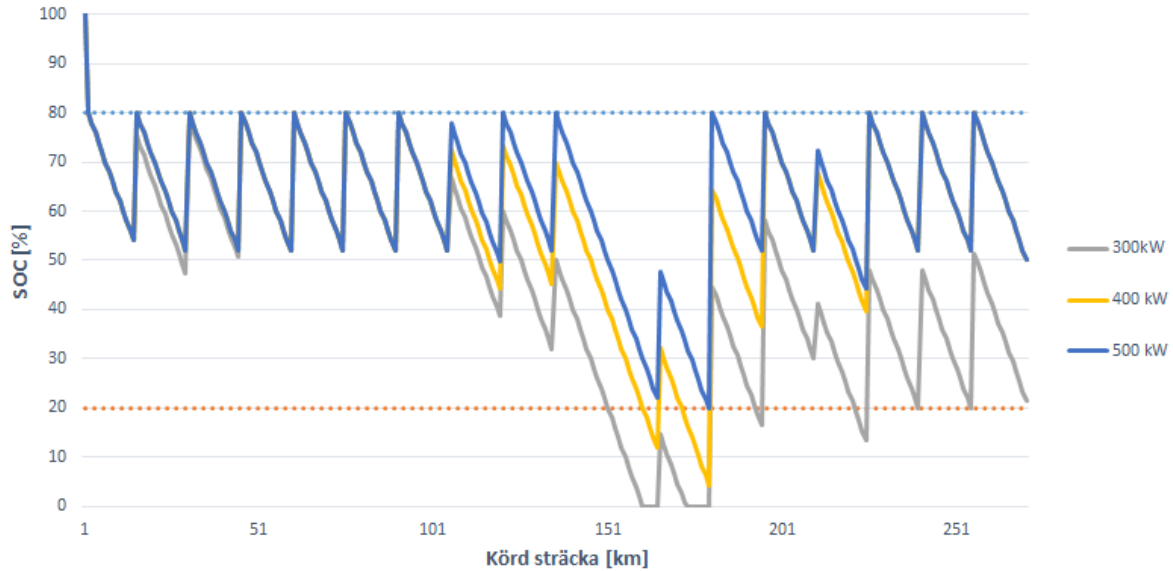


Figur 7: Grafen illustrerar SOC för en buss som kör omlopp 808 en vardag med olika laddningseffekter vid ändhållplatserna. Bussens specifika energianvändning är 3 kWh/km och de streckade linjerna markerar SOC-fönstret (20–80 %) för ett batteri med 150 kWh. De heldragna linjerna representerar laddningseffekt om 300, 400, respektive 500 kW.

Figur 8 och 9 illustrerar SOC för omlopp 607 respektive 808 en vardag om bussen missar ett laddningstillfälle. I Figur 8 utgår ett laddningstillfälle om 15 minuter, det laddningstillfälle som var avgörande för återhämtningen i scenariot med 300 kW i Figur 6. Det resulterar i att vid scenariot med 300 kW ligger SOC utanför det tillåtna SOC-fönstret, till och med under 0 vid vissa tidpunkter. Vid scenarierna med 400 och 500 kW ligger SOC inom de tillåtna gränserna och kan även återhämta den missade laddningen inom den befintliga reglertiden. I Figur 9 utgår ett laddningstillfälle om 14 minuter, det laddningstillfälle där SOC var som lägst i scenariot med 300 kW i Figur 7. Den missade laddningen innebär att det bara är vid 500 kW-scenariot som SOC håller sig inom det tillåtna SOC-fönstret.



Figur 8: Grafen illustrerar SOC för en buss som kör omlopp 607 en vardag och missar ett 15 minuters laddningstillfälle efter drygt 200 km. Bussens specifika energianvändning är 3 kWh/km och de streckade linjerna markerar SOC-fönstret (20–80 %) för ett batteri med 150 kWh. De heldragna linjerna representerar laddningseffekt om 300, 400, respektive 500 kW.



Figur 9: Grafen illustrerar SOC för en buss som kör omlopp 808 en vardag och missar ett 14 minuters laddningstillfälle efter drygt 130 km. Bussens specifika energianvändning är 3 kWh/km och de streckade linjerna markerar SOC-fönstret (20–80 %) för ett batteri med 150 kWh. De heldragna linjerna representerar laddningseffekt om 300, 400, respektive 500 kW.

4.2 Känslighetsanalys

I känslighetsanalysen undersökts ytterligare tre scenarier. Att bussen får kortare laddtid än reglertiden kan uppstå vid förseningar men även för att det tar tid att starta och avbryta laddning. Omloppsschemat kan ändras om elbussar introduceras i stor skala. Därför var det intressant att undersöka olika strategier i form av stödladdning och garanterad laddtid. Känslighetsanalysen antas påverka båda linjerna på liknande sätt, därför gjordes den endast för linje 6.

4.2.1 Förkortad laddtid

Det är intressant att studera scenarier med kortare laddtid av flera anledningar. Kortare laddtid än reglertiden kan uppstå på grund av att bussen är försenad och viss tid kommer alltid försvinna för att starta och avsluta laddning. Erfarenheter från tidigare projekt¹⁶ visar att det, sammanlagt, tar cirka en minut att starta och avbryta laddningen. I scenario 'Minus 1 min' har tiden tillgänglig för laddning vid varje laddningstillfälle förkortats med en minut från den tid som står angiven i omloppsschemat. Tiden för laddning förkortas ytterligare i scenario 'Minus 2 min' och 'Minus 3 min'. Vid scenarier då laddningstiden förkortats med två minuter eller mer utgår ett laddningstillfälle, då omloppsschema vid ett tillfälle har reglertid som endast är två minuter. I Tabell 13 presenteras resultaten för scenarier där tiden för laddning förkortats och det är tydligt att storleken på batteriet ökar med kortare tid för laddning. Scenario 'Minus 1 min' resulterade i en ökning av batteristorleken

¹⁶Samtal med Joakim Nyman, RISE Viktoria 26/4 2019.

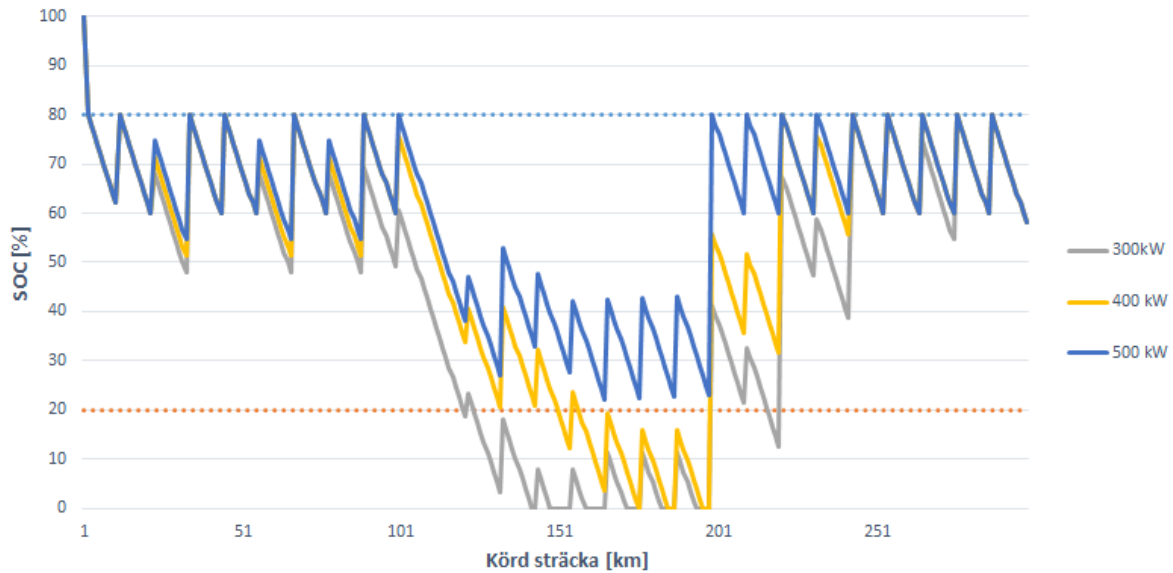
med 50 %, 30 % respektive 38 % med laddeffekt 300, 400, respektive 500 kW jämfört med grundfallet. Detta kan motverkas genom att höja effekten vid laddningsstationen. Vid en minut kortare tid för laddning kräver scenariot med 300 kW laddeffekt ett batteri som är större än vid en missad laddning. Det är på grund av att ett laddningstillfälle om en minut följs av en treminutersladdning – vilket inte är tillräckligt för att bussen ska kunna ladda upp den energi som används under den körda sträckan.

Detta antyder att det som är dimensionerande vid 300 kW laddeffekt inte är kapaciteten att klara en utebliven laddning utan att klara av att hantera flera laddningstillfällen då tiden inte är tillräcklig för att återhämta den körda sträckan. Med två minuter kortare tid för laddning krävs ett batteri som är 55 % större än vid scenariot med en missad laddning.

Tabell 13: *Scenarier där den tillgängliga tiden för laddning minskas med en, två och tre minuter vid varje laddningstillfälle för en buss som kör omlopp 607 en vardag. Batteristorlekens förändring är angiven i procent i förhållande till grundfallet.*

Scenario	Effekt [kW]	Missad laddning [Min]	Batteristorlek [kWh]
Grundfall	300	Ingen	160
Minus 1 min	300	Ingen	240 (+ 50 %)
Minus 2 min	300	2	340 (+ 113 %)
Minus 3 min	300	2	420 (+ 163 %)
Grundfall	400	Ingen	100
Minus 1 min	400	Ingen	130 (+ 30 %)
Minus 2 min	400	2	230 (+ 130 %)
Minus 3 min	400	2	340 (+ 240 %)
Grundfall	500	Ingen	80
Minus 1 min	500	Ingen	110 (+ 38 %)
Minus 2 min	500	2	150 (+ 109 %)
Minus 3 min	500	2	260 (+ 225 %)

Figur 10 illustrerar SOC för en buss som har två minuter kortare tid till laddning än dagens omloppsschema. Det resulterar i att ett laddningstillfälle vid 50 km endast blir en minut långt samt att ett tillfälle vid 100 km missas, vilket i sin tur resulterar i ett stort fall i SOC för alla scenarierna och att laddning med 300 kW faller utanför SOC-fönstret. Med 400 kW laddningseffekt klarar bussen den missade laddningen men klarar inte av att återhämta sig med de kortare tiderna. Med 500 kW laddeffekt klarar bussen av både det uteblivna laddningstillfället samt flera på varandra efterföljande korta laddningstillfällen för att sedan ladda upp batteriet fullt vid ett längre laddningstillfälle.

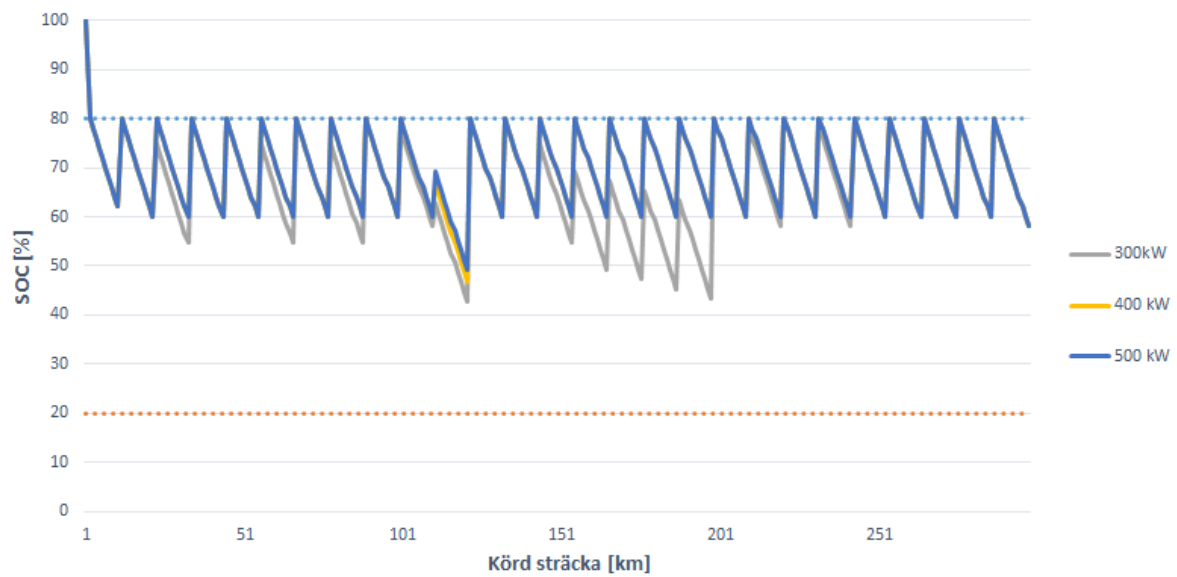


Figur 10: Grafen illustrerar SOC för en buss som kör omlopp 607 en vardag och har två minuter kortare laddtid än reglertiden i omloppsschemat. Bussens specifika energianvändning är 3 kWh/km och de streckade linjerna markerar SOC-fönstret (20–80 %) för ett batteri med 150 kWh. De heldragna linjerna representerar laddningseffekt om 300, 400, respektive 500 kW.

4.2.2 Stödladdning

Med stödladdning menas här att tiden för laddning vid ett tillfälle har förlängts tills att batteriet laddats upp till 80 %. Det kräver dock att omloppsschemat måste justeras och stödladdning är den tid som har lagts till utöver omloppsschemat för att bussen ska hinna ladda upp till 80 % av SOC. Det ger bussen bättre förutsättningar att hantera icke-optimala laddningstillfällen.

Tabell 14 presenterar de batteristorlekar som är nödvändiga för scenarier som involverar stödladdning (SL). I scenariot *grundfall*, *SL*, har ett stödladdningstillfälle lagts till det ursprungliga omloppsschemat. I de andra scenarierna (Minus x min) har tiden tillgänglig för laddning förkortats på samma sätt som i avsnitt 4.2.1, vilket resulterar i att den extra tid som krävs för stödladdning ökar. Jämförs grundfallsscenarier med och utan stödladdning blir det tydligt att stödladdningen har störst påverkan vid 300 kW laddeffekt, då storleken på batteriet minskar från 160 kWh till 100 kWh. I de scenarier då tiden tillgänglig för laddning minskar bidrar stödladdningen till att minska storleken på batteriet, (jämför med Tabell 13).



Figur 11: Grafen illustrerar SOC för en buss som kör omlopp 607 en vardag med 8 minuters stödladdning efter 126 km. Det tillåter att scenariot med 300 kW hinner ladda upp till 80 % SOC. Bussens specifika energianvändning är 3 kWh/km och de streckade linjerna markerar SOC-fönstret (20–80 %) för ett batteri med 150 kWh. De heldragna linjerna representerar laddningseffekt om 300, 400, respektive 500 kW.

Tabell 14: Resultat för scenarier där en buss som kör omlopp 607 en vardag har fått extra tid vid ett laddningstillfälle för att kunna ladda batteriet fullt. Batteristorlekens förändring är angiven i procent i förhållande till grundfallet.

Scenario	Effekt [kW]	Stödladdning [Min]	Batteristorlek [kWh]
Grundfall	300	Ingen	160
Grundfall, SL	300	8	100 (-38 %)
Minus 1 min, SL	300	12	140 (-13 %)
Minus 2 min, SL	300	17	190 (+19 %)
Minus 3 min, SL	300	22	250 (+56 %)
Grundfall	400	Ingen	100
Grundfall, SL	400	4	90 (-10 %)
Minus 1 min, SL	400	8	100 (+/- 0 %)
Minus 2 min, SL	400	9	130 (+30 %)
Minus 3 min, SL	400	13	190 (+90 %)
Grundfall	500	Ingen	80
Grundfall, SL	500	2	80 (+/-0 %)
Minus 1 min, SL	500	4	100 (+20 %)
Minus 2 min, SL	500	6	110 (+38 %)
Minus 3 min, SL	500	8	150 (+88 %)

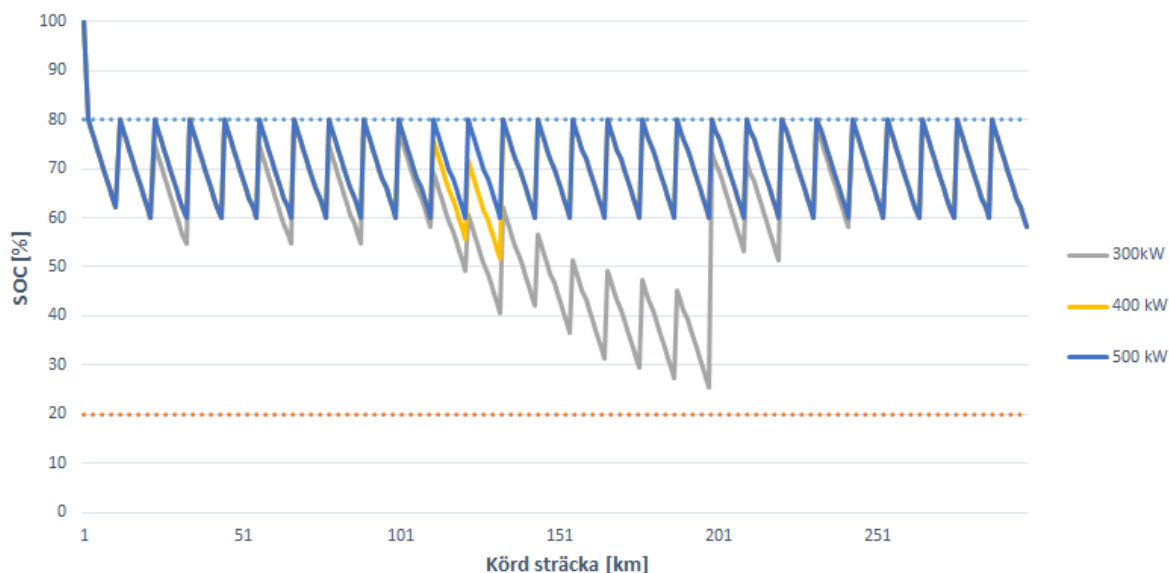
4.2.3 Garanterad laddtid

Tabell 15 visar resultatet för scenarier med minst fyra minuter garanterad laddtid (GL). I scenariot *grundfall*, GL, är tiden för laddning samma som reglertiden i omloppsschemat förutom ett tillfälle om två minuter som har förlängts till fyra minuter. I de andra scenarierna har tiden tillgänglig för laddning förkortats på samma sätt som i avsnitt 4.2.1 samtidigt som fyra minuter laddtid garanteras, vilket leder till att fler tillfällen måste förlängas. Tiden som presenteras i 'Total extra laddning' är den sammanlagda tiden som har lagts till för att kunna garantera fyra minuters laddtid. Batteriet som krävs i grundfall, GL, är 20 kWh mindre, för alla effektnivåer, än vad som krävs i grundfallsscenierna. Den garanterade laddtiden får större effekt när reglertiden förkortas och den största skillnaden syns i scenarier med 500 kW effekt där batteriet inte blir större än 60 kWh. Med 500 kW laddeffekt är fyra minuter tillräckligt för en fullständig laddning efter en körd tur.

Resultaten av den garanterade tiden för laddning illustreras i Figur 12. SOC för scenariot med 300 kW laddeffekt sjunker mellan 100 och 200 km till följd av en rad laddningstillfällen som alla är under sju minuter långa men kan sedan återhämta sig vid 200 km under ett längre laddningstillfälle. Scenarierna med 400 kW respektive 500 kW laddeffekt följer varandra förutom vid två tillfällen då laddtiden är fyra minuter, vilket leder till att 400 kW-scenariot faller något i SOC men kan återhämta laddning snabbt. I scenariot med 500 kW pendlar SOC inom intervallet 60 och 80 % under dagen. Det är ett resultat av att bussen hinner ladda den energi som krävs för köra sträckan vid varje laddningstillfälle.

Tabell 15: Resultat för scenarier där en buss som kör omlopp 607 en vardag har fyra minuter garanterad laddtid, trots förkortade reglertider. Batteristorlekens förändring är angiven i procent i förhållande till grundfallet.

Scenario	Effekt [kW]	Total extra laddning [Min]	Batteristorlek [kWh]
Grundfall	300	Ingen	150
Grundfall, GL	300	2	140 (-7 %)
Minus 1 min, GL	300	4	210 (+40 %)
Minus 2 min, GL	300	11	260 (+73 %)
Minus 3 min, GL	300	23	280 (+87 %)
Grundfall	400	Ingen	100
Grundfall, GL	400	2	80 (-20 %)
Minus 1 min, GL	400	4	80 (-20 %)
Minus 2 min, GL	400	11	140 (+40 %)
Minus 3 min, GL	400	23	150 (+50 %)
Grundfall	500	Ingen	80
Grundfall, GL	500	2	60 (-25 %)
Minus 1 min, GL	500	4	60 (-25 %)
Minus 2 min, GL	500	11	60 (-25 %)
Minus 3 min, GL	500	23	60 (-25 %)



Figur 12: Grafen illustrerar SOC för en buss som kör omlopp 607 en vardag då omloppsschemat har ändrats för att garantera fyra minuter för laddning vid varje ändhållplats. Bussens specifika energi-användning är 3 kWh/km och de streckade linjerna markerar SOC-fönstret (20–80 %) för ett batteri med 150 kWh. De heldragna linjerna representerar laddningseffekt om 300, 400, respektive 500 kW.

4.2.4 Sammanfattning av känslighetsanalysen

Resultaten från känslighetsanalysen visar att effekten av ett scenario inte nödvändigtvis är den samma vid olika laddeffekter. Vid minskad tid för laddning påverkas scenarier med lägre laddeffekt mer än de med hög laddeffekt vilket blir tydligt i Tabell 13 och Tabell 16. Jämfört med grundfallsscenarioet krävde Minus 1 min-scenariot en ökning av batteristorleken med 50 %, 30 % och 38 % med 300 kW, 400 kW, respektive 500 kW laddeffekt. Ordningen är den omvända i scenarierna med missad laddning där scenariot med 500 kW hade störst procentuell ökning (88 %). Effekten av stödladdning var större för de lägre laddeffekterna där batteristorleken minskade med nästan 40 % i 300 kW-scenariot medan det var oförändrat i 500 kW-scenariot.

Tabell 16: *Sammanställning av resultaten från de olika scenarier som testats i känslighetsanalysen samt resultatet i grundfallsscenarioet för jämförelse. Batteristorlekens förändring är angiven i procent i förhållande till grundfallet.*

Laddeffekt [kW]	Grundfall	Missad laddning	Minus 1 min	Stödladdning	Garanterad laddtid
300	160	220 (+ 38 %)	240 (+ 50 %)	100 (- 37 %)	140 (- 12 %)
400	100	150 (+ 50 %)	130 (+ 30 %)	90 (- 10 %)	80 (- 20 %)
500	80	150 (+ 88 %)	110 (+ 38 %)	80 (+/- 0 %)	60 (- 25 %)

5 Analys

5.1 Batteristorlek relativt flexibilitet

Hur implementering av elbussar i fordonsflottan sker är av stor betydelse för vilka krav som ställs på infrastrukturen. Hypotesen i det här arbetet var att det skulle finnas att par dimensionerande omlopp som trafikerade rusningstiderna under vardagarna. Denna studie visar på att det ofta finns en eller ett par omlopp på varje linje som är dimensionerande, vanligtvis de omlopp där bussen är ute i trafik hela dagen och har perioder av korta reglertider. Fördelen med att elektrifiera dessa omlopp är att de bidrar till en hög utnyttjandegrad av elbussarna och många ”el-kilometer”. Nackdelen är att det ställer högre krav, antingen större batteri eller högre laddeffekt, än om mindre krävande omlopp valdes att elektrifieras. Genom att dimensionera efter den mest krävande omloppet på linjen säkerställs att bussen kan trafikera alla omlopp på linjen, men som resultaten i Tabell 8, 9 och 12 visar, skiljer sig dimensioneringen mellan linjer och veckodagar. Detta ger två huvudsakliga alternativ; dimensionering för minsta möjliga batteri eller dimensionering för största möjliga flexibilitet.

Med flexibilitet i bussflottan menas hur väl de individuella bussarna kan trafikera olika turer och omlopp. För att bevara bussflottans flexibilitet är det önskvärt att en buss ska kunna trafikera så många turer och omlopp som möjligt. Hur flexibel en lösning är beror främst på bussens räckvidd

vilket i sin tur är beroende av batteriets storlek samt bussens energianvändning. Små batterier har varit ett av de starkaste argumenten för tilläggsaddning - då batteriet utgör en stor kostnad och ett batteribyte är att förvänta sig under bussens livstid. Genom att ge bussen tillräcklig tid att vid varje laddningstillfälle kunna ladda batteriet fullt kan batteristorleken minimeras. Det kräver att bussen har en viss garanterad tid för laddning, en tid som bestäms av längden på sträckan samt laddeffekten.

En annan strategi för att minska batteristorleken är att använda sig av stödladdning, det ger inte det minsta möjliga batteriet men påverkar inte heller omloppsschemat lika mycket. En stor nackdel med att optimera för minsta batteri är att bussen blir oflexibel samt beroende av laddning vid varje ändhållplats. Enkelt räknat kräver linje 6, som är 11 km lång, 33 kWh elenergi för att köra sträckan om den specifika energianvändningen är 3 kWh/km. Med ett 60 % SOC-fönster innebär det att batteriet måste vara ungefär 60 kWh stort. Skulle ett batteri på 60 kWh användas finns inte tillräckligt mycket energi i batteriet för att missa en laddning och fortsätta köra. Skulle en av pantograferna tas ur bruk av någon anledning, till exempel för reparation, är det inte möjligt att köra bussen med endast en pantograf. Det skulle däremot vara möjligt med ett större batteri i kombination med förlängd tid för laddning för att kompensera för att laddning endast sker vid ena ändhållplatsen.

Att bussen ska ha batterikapacitet nog att klara av att missa en laddning är något som bör tas med i dimensioneringen av systemet^{17 18}. Med utgångspunkt från dagens omloppsschema simulerades en missad laddning, och en dimensionerande batteristorlek togs fram för tre olika laddeffekter. Resultaten visar vilken påverkan en missad laddning har för dimensioneringen av batteristorlek.

En missad laddning skulle kräva ett batteri som är 38–88 % större än vid grundfallet beroende på laddeffekt, se Tabell 16. Trots att batteriet redan har mer energikapacitet än vad sträckan kräver krävs det alltså en markant ökning i batteristorlek för att klara en missad laddning. Orsaken ligger i hur omloppsschemat är utformat där det i dagsläget inte finns tillräckligt med reglertid för att helt ladda med den energi som använts sen senaste sträckan. Som Figur 8 och 9 visar innebär de korta reglertiderna ofullständiga laddningar och perioder av fallande SOC. Sker den missade laddningen då SOC är lågt kommer ett mycket större batteri krävas. Genom att simulera missad laddning för den mest kritiska laddningen kunde batteriet dimensioneras för att klara av att missa en laddning, oavsett vilket tillfälle som missas. Tabell 8 och 9 visar att det inte bara var ett specifikt laddningstillfälle som var dimensionerande och Figur 6 och 7 visar att även grundfallsscenarierna utnyttjar en stor del av SOC-fönstret. Överraskande var att helgdagarna ställer högre krav, se Tabell 12, trots att turtätheten är lägre då. Med 300 kW laddeffekt kräver en missad laddning på helgdagar en procentuell ökning av batteriet med 18 % och 123 % för omlopp 607 respektive omlopp 808 jämfört med vardagar. Det sker på grund av att det är färre fordon i trafik och omloppen är långa med få laddningstillfällen med längre reglertid.

¹⁷Maria Xylia, PhD, Konsult Energy Strategies, Sweco. 21/2 2019.

¹⁸Joakim Nyman, Senior researcher, RISE Viktoria, 26/4 2019.

Resultatet visar tydligt hur bussens energianvändning påverkar kraven som ställs på dimensioneringen av infrastrukturen. Figur 4 och 5 visar hur scenarier med hög energianvändning resulterar i flera ofullständiga laddningar vilket kräver ett större batteri för att energinivån ska hålla sig inom SOC-fönstret. Anledningen till de ofullständiga laddningarna är att reglertiden inte är tillräcklig för att bussen ska kunna ladda med den energi som just använts den senaste sträckan. Tabell 17 visar att om dimensioneringen sker utifrån en lägre energianvändning kommer storleken på batteriet kunna minskas markant framför allt med lägre laddeffekt. Det ökar dock risken att bussen inte klarar av den tänkta trafiken under perioder med dåliga körförhållanden. Antagandet om 3 kWh/km är avsett för att ta höjd för en kombination av dåligt väder och ogynnsam körning, något som mycket väl kan ske under vintermånaderna och bör därför vara dimensionerande.

Tabell 17: *Energianvändningens påverkan på batteristorleken för omlopp 607 en vardag. Batteristorleken förändring anges i procent i förhållande till 3 kWh/km.*

Laddeffekt [kW]	Energianvändning [kWh/km]	Missad laddning [kWh]
300	3	220
300	2	70 (- 68 %)
300	1,5	60 (- 73 %)
400	3	110
400	2	70 (- 36 %)
400	1,5	60 (- 46 %)
500	3	110
500	2	70 (- 36 %)
500	1,5	60 (- 46 %)

För linje 6 gäller att om batteriet dimensioneras efter det mest krävande omloppet med laddeffekt 300 kW kommer det krävas ett 220 kWh-batteri för att klara av en missad laddning på vardagar och 260 kWh för helgdagar. För linje 8 skulle det krävas ett 260 kWh-batteri för att klara en missad laddning på vardagar och ett 580 kWh-batteri för helgdagar. Helgtrafiken på linje 8 ställer alltså mycket högre krav än linje 6, se Tabell 18. Det betyder att om batteriet ska dimensioneras efter den mest flexibla lösningen, att bussarna ska kunna köra både linje 6 och linje 8 alla dagar, kommer ett större batteri än nödvändigt användas på linje 6. En möjlig lösning, då inte hela bussflottan kommer att elektrifieras samtidigt, är att dimensionera batteriet efter behovet på vardagar för linje 8 och helger för linje 6. Med 260 kWh-batterier kan bussarna trafikera linje 6 alla dagar men endast köra linje 8 under vardagarna. Om även helgtrafiken på linje 8 ska elektrifieras kan det sättas in fler bussar för att tillåta mer tid för laddning.

Om laddeffekten höjs till 500 kW minskar batteristorleken på både linje 6 och linje 8 för både vardagar och helger. För linje 6 blir vardagar dimensionerande medan på linje 8 är fortfarande helger. Linje 8 har fortfarande högre krav på batteristorlek och om bussarna ska kunna trafikera båda linjerna blir den dimensionerande. Däremot skiljer det sig inte lika mycket då linje 8 kräver ett 190 kWh-batteri och linje 6 ett 150 kWh-batteri. Med 500 kW laddeffekt är det med andra ord tänkbart att dimensionera för båda linjerna utan att behöva överdimensionera allt för mycket för linje 6.

Tabell 18 presenterar de dimensionerande batteristorlekarna för linje 6 och linje 8.

Tabell 18: *Dimensionerande batteristorlek för linje 6 och linje 8 med 300 kW laddeffekt.*

Scenario	Effekt [kW]	Batteristorlek [kWh]
Linje 6, helg	300	260
Linje 6, vardag	300	220
Linje 8, helg	300	580
Linje 8, vardag	300	260
Linje 6, helg	500	110
Linje 6, vardag	500	150
Linje 8, helg	500	190
Linje 8, vardag	500	170

5.2 Känslighetsanalys

Det tar tid för laddningen att starta från det att bussen anländer. Erfarenheter från Göteborg visar att det sammanlagt rör sig om cirka en minut då bussen står stilla utan att laddning sker vilket blir relevant när omlopp skall planeras. Den här studien har approximerat att laddningen sker linjärt, i verkligheten sker en upp- och nedrampning av effekten för att skydda batteriet vilket även det påverkar laddtiden. I känslighetsanalysen testas scenarier där reglertiden kortas ned med en minut per tillfälle vilket motsvarar hur mycket tid som faktiskt finns tillgänglig för laddning i nuvarande omloppsschema. Minus 1 min-scenariot resulterar i att 300 kW laddeffekt kräver ett 50 % större batteri än grundfallet, en större procentuell ökning än för en missad laddning (38 %).

Med 500 kW laddeffekt krävs en 38 % ökning jämfört med grundfallet, vilket är betydligt mindre än vad som krävdes för en missad laddning (88 %). Det beror på att med en högre laddeffekt kan mer energi laddas upp under de kortare laddningstillfällena, vilket gör det mindre känsligt för kortare tider. Däremot har batteriet en låg total energikapacitet vilket gör det känsligt för missade laddningar. Intressant här är att det är enda gången som 400 kW-scenariot inte ligger mellan de två andra utan faktiskt har lägst procentuell ökning.

Tabell 13 visar att förhållandet i den procentuella ökningen blir det omvända med ytterligare förkortning av laddtid och i Minus 3 min-scenariot kräver 300 kW-scenariot ett 263 % och 500 kW-scenariot ett 325 % större batteri. Anledningen till det är att i Minus 3 min-scenariot utgår ett laddningstillfälle och efterföljs av sju tillfällen med fyra minuter eller mindre tid för laddning. Det är eftermiddagsrusningen som kräver hög turtäthet och kortar ned reglertiderna. Det innebär att inte ens med 500 kW laddeffekt har bussen tid att återställa SOC-nivån efter den körda sträckan, än mindre ta igen för den missade laddningen.

Batteristorleken kan minskas genom att ett laddningstillfälle förlängs och tillåter bussen att ladda upp till 80 % SOC, vilket presenteras i Tabell 14. Störst skillnad sker för scenariot med 300 kW laddeffekt som kan använda ett nästan 40 % mindre batteri än i grundfallet. Effekten av stödladdning syns tydligt med 300 kW laddeffekt när det jämförs med grundfallet. I grundfallet sker en ofullständig laddning vid 115 km och följs av ett kontinuerligt fall i SOC till ett längre laddningstillfälle vid 200 km (se Figur 6). I Figur 11 sker en stödladdning vid 126 km som motverkar fallet i SOC och ger bättre marginaler för att hantera de ofullständiga laddningarna vid 150–200 km.

Effekten av stödladdning ökar när laddningstiden förkortas, där 300 kW laddeffekt kräver en ökning med 163 % vid tre minuters kortare laddtid och endast 56 % med stödladdning. Anledningen till detta är att när tiden tillgänglig för laddning minskar hinner inte bussen återställa SOC-nivån efter den körda sträckan - vilket resulterar i ett kontinuerligt fall i SOC. Om batteriet är fullt innan en period av kortare laddningstillfällen är marginalerna större för bussen att hantera ofullständiga laddningar. Stödladdning har inte lika stor påverkan på scenariot med 500 kW laddeffekt. Det beror på att med högre laddeffekt hinner bussen återställa en betydande del av SOC-nivån från den körda sträckan även vid de kortare laddningstillfällena. Däremot när tiden förkortas med två och tre minuter sker en procentuell ökning som är i samma storleksordning som för 300 kW laddeffekt. Det beror på att i dessa scenarier sker det flera laddningar som är under fyra minuter, vilket innebär ofullständiga laddningar även med 500 kW. Det ska tilläggas att känslighetsanalyserna endast är gjorda på linje 6 som är 11 km lång och tiden för laddning ökar linjärt med linjens längd. Det innebär att för en linje med längre sträcka kan stödladdning ha stor påverkan även vid högre laddeffekter.

Genom att garantera tillräckligt med laddtid för fullständig laddning vid varje laddningstillfälle kan batteristorleken minimeras. Figur 12 visar hur detta påverkar SOC under ett omlopp där laddtiden är tillräcklig för fullständig laddning med 500 kW laddeffekt. I detta scenario garanteras fyra minuters laddtid vilket är tillräckligt för att ladda den körda sträckan med 500 kW laddeffekt, vilket innebär att SOC aldrig faller under 60 %. Då kan ett 60 kWh-batteri användas, jämfört med 80 kWh i grundfallet. Det är under rusningstrafiken som den garanterade laddtiden har störst påverkan då den förhindrar ett kontinuerligt fall i SOC. Skillnaden med och utan garanterad laddtid syns tydligt i Figur 6 och 12 där SOC med 500 kW laddeffekt aldrig faller under 60 % och för 300 kW blir fallet i SOC mindre. Tack vare att SOC-nivån är hög genom hela omloppet skulle bussen kunna missa vilken laddning som helst utan att falla under SOC-fönstret. Fyra minuter är dock inte tillräckligt om laddning sker med lägre laddeffekt, vilket är anledningen till fallet i SOC som sker med 300 kW laddeffekt efter drygt 120 km till 200 km i Figur 12. Om laddning sker med 300 kW laddeffekt skulle det krävas sju minuter vid varje tillfälle för att kunna ladda fullt vilket skulle innebära stora förändringar i omloppsschemat. Förarkostander står för en stor del av bussoperatörernas utgifter och längre reglertider innebär längre omloppstider vilket leder till högre förarkostnader. Om samma turtäthet ska upprätthållas kan det även ytterligare fordon krävs för att klara av trafiken. Tabell 15 visar tydligt sambandet mellan påverkan av den garanterade laddtiden och laddeffekten. Då den garanterade laddtiden i detta scenario var tillräcklig för fullständig laddning med 500 kW laddeffekt är det där den gör störst skillnad. Då laddtiden aldrig blir kortare än fyra minuter kan fullständig laddning ske även i Minus 3 min-scenariot.

Trots att laddtiden inte är tillräcklig för fullständig laddning för de lägre laddeffekterna gör den det möjligt att minska batteristorleken jämfört med grundfallet, 7 % respektive 20 % för 300 respektive 400 kW laddeffekt.

5.3 Ekonomi

Kostnaden för tilläggsaddning vid ändhållplatser kan delas upp i infrastrukturkostnader och busskostnader. Kostnaden för infrastrukturen är inte beroende av antalet bussar, till exempel antal pantografer eller nätanslutningar, medan busskostnader, till exempel batteri och laddningsplats vid depån, är det. I Tabell 18 redovisas kostnaderna för att elektrifiera linje 6 och linje 8 med två olika laddeffekter, 300 respektive 500 kW. Priserna är ungefärliga och har sammanställts från olika källor (Trafikförvaltningen SLL, 2019c), (WSP, 2018a), (Vattenfall, 2019).

Tabell 19: *Kostnad för tilläggsaddning vid ändhållplats för linje 6 och linje 8 om de dimensioneras efter worst case-scenariot med missad laddning.*

	300 kW		500 kW	
	Linje 6	Linje 8	Linje 6	Linje 8
Pantografer (2) inkl. installation [Mkr]*	6 – 7	6 – 7	6 – 7	6 – 7
Nätanslutning [Mkr]	0,3	0,3	0,5	0,5
Antal bussar	9	11	9	11
Laddning vid depå [Mkr]	0,25	0,25	0,25	0,25
Buss [Mkr]*	4,75 – 6,2	4,75 – 6,2	4,75 – 6,2	4,75 – 6,2
Batteri [Mkr]**	3,6	8,1	2,1	2,7
Totalt [Mkr]	84 – 98	151 – 168	70 – 85	91 – 108

* Pris från (WSP, 2018a)

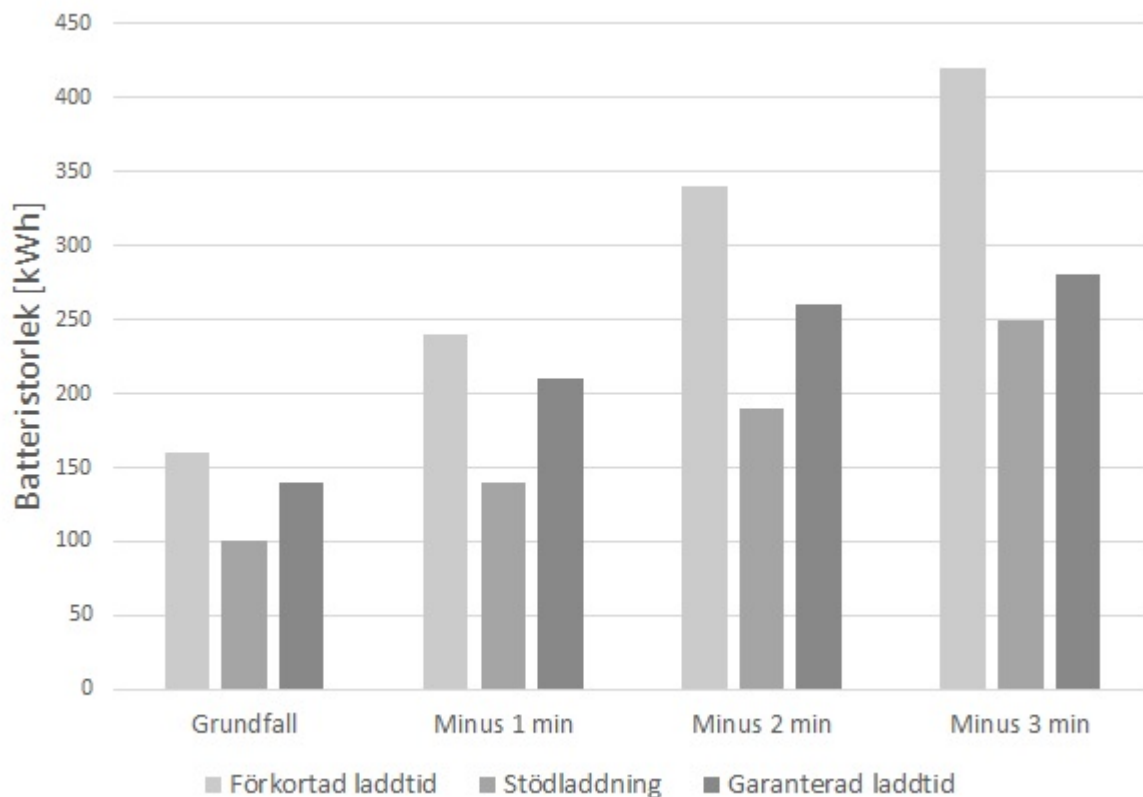
** Pris från (WSP, 2018a) och (Trafikförvaltningen SLL, 2019c)

5.4 Sammanfattning

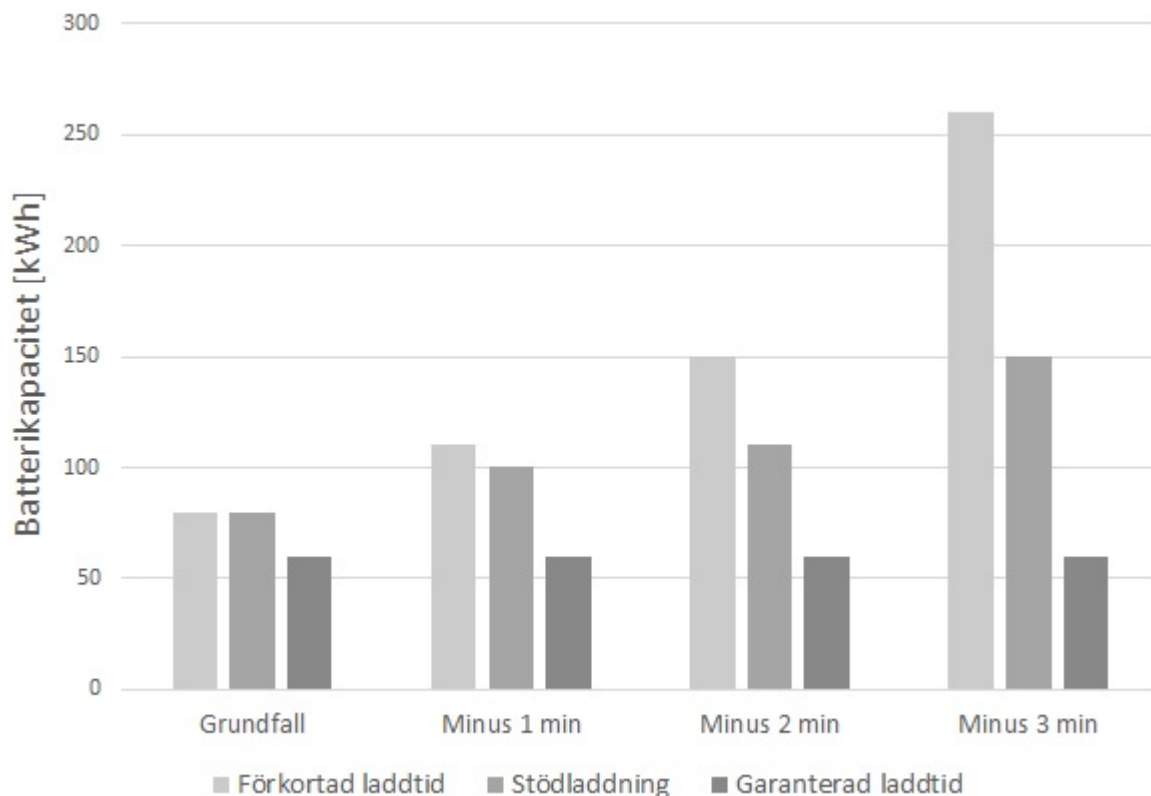
Resultatet från känslighetsanalysen visar att de scenarier som testades hade olika stor påverkan beroende på vilken laddeffekt som användes. I Tabell 16 jämförs de olika scenarierna och den procentuella förändringen i batteristorleken jämfört med grundfallet. Med 300 kW laddeffekt var det minskad laddtid som hade störst påverkan där redan en minuts förkortning resulterar i ett större batteri än vid en missad laddning. En missad laddning resulterar i en större procentuell ökning i 500 kW-scenariot än för 300 kW. En möjlig förklaring är att batteriet i 300 kW-scenariot redan är så pass stort att känsligheten för en missad laddning är relativt låg jämfört med 500 kW.

Figur 13 visar att om laddeffekten är 300 kW kommer stödladdning resultera i det minsta batteriet, även vid kortare laddtider. Figur 14 visar att om laddeffekten är 500 kW är det istället garanterad laddtid som ger minst batterier. Batteristorleken är mindre i alla scenarier med 500 kW laddeffekt,

vilket var förväntat. Anledningen till att stödladdning ger lägre batteristorlek vid lägre laddeffekt är den totala energikapaciteten i batteriet. Då stödladdning innebär att batteriet får ladda upp till 80 %, oavsett hur lång tid det tar, kommer batterier med stor total energikapacitet att ladda mer energi. Med hög laddeffekt kan batterier med mindre energikapacitet användas vilket gör att långa laddtider inte blir lika viktigt. Den snabba laddningen utnyttjas bättre med regelbunden garanterad laddtid.



Figur 13: Jämförelse mellan de olika scenarierna då laddtiden förkortas. Laddeffekten är 300 kW.



Figur 14: Jämförelse mellan de olika scenarierna och storlek på batteriet då laddeffekten är 500 kW.

Tabell 20: Scenarier där den tillgängliga tiden för laddning minskas med en minut vid varje laddnings-tillfälle för en buss som kör omlopp 607 en vardag. GL står för garanterad laddtid och SL står för stödladdning. Batteristorlekens förändring anges i procent i förhållande till grundfallet.

Scenario	Effekt [kW]	Extra tid	Batteristorlek [kWh]
Grundfall	300	-	160
Missad	300	-	240 (+50 %)
Minus 1 min, SL	300	12	140 (-13%)
Minus 1 min, GL	300	4	210 (+31 %)
Grundfall	400	-	100
Minus 1 min	400	-	130 (+30 %)
Minus 1 min, SL	400	8	100 (+0 %)
Minus 1 min, GL	400	4	80 (-20 %)
Grundfall	500	-	80
Minus 1 min	500	-	110 (+38 %)
Minus 1 min, SL	500	4	100 (+11 %)
Minus 1 min, GL	500	4	60 (-33 %)

6 Diskussion

Något som har blivit uppenbart under arbetets gång är att elektrifiering kräver mer omfattande planering än omställning från diesel till drop-in-biodrivmedel¹⁹. Omställning till elbussar innebär mer än bara ändring av drivmedel och för att det ska fungera och vara lönsamt kommer ett holistiskt perspektiv av busstrafiken krävas. När bussen får begränsad räckvidd och laddning tar markant längre tid än tankning krävs ett nytt sätt att planera trafiken då bussarna inte kan köra på samma sätt. Det kommer även krävas ny infrastruktur och kompetens.

Skillnader i längder på linjer, reglertider på omlopp och varierande turer för bussarna gör att det är svårt att hitta en enskild lösning som kan fungera för ett helt system. Det blir därför intressant att identifiera typer av omlopp och att välja infrastruktur utifrån dessa. Exempelvis kan stomlinjer, linjer som trafikeras med hög turtäthet och under stora delar av dygnet, vara problematiska med depåladdade bussar. Bussen har helt enkelt inte tillräcklig räckvidd för att köra hela dagen utan måste återvända till depån för laddning vilket resulterar i tomkörning och ökat antal bussar. I dessa fall kan tilläggs-laddning vid ändhållplatser vara lämpligt då det tillåter bussen att köra hela dagen utan att behöva åka tillbaka till depån. Å andra sidan finns det linjer som är för långa för tilläggs-laddning vid ändhållplatser, vilka då istället kan trafikeras av depåladdade bussar. Depåladdade bussar är även mer flexibla än tilläggs-laddade bussar, på grund av större batterier, och kan vara lämpliga för att komplettera tilläggs-laddade bussar vid rusningstrafik samt ta turer på olika linjer under dagen.

Ett vanligt förekommande argument för tilläggs-laddning är att besparingar kan göras i och med mindre batterier. Detta kan dras till sin spets i fall där bussens batteri optimeras för ett enskild omlopp, eller att laddning sker med hög effekt. Principiellt är det inget fel med det, men det är en strategi som inte är lämplig eller ens möjlig för alla städer. En stor nackdel med att optimera batteriet till en specifik linje är att det inskränker flexibiliteten i bussflottan och kan leda till att ytterligare bussar måste införskaffas. Om målet vid dimensionering av batteriet är att minimera storleken riskerar det att resultera i stora förändringar i omloppsschemat för att säkerställa tillräcklig laddning. Detta kan visa sig problematiskt då busstrafiken i dagsläget följer relativt tydliga mönster med ökat resande på morgonen och eftermiddagen, då folk ska ta sig till och från arbetsplatser. Det innebär att fler bussar är i trafik samtidigt som reglertiderna kortas under dessa perioder. Om lämpligheten för tilläggs-laddning vid ändhållplatser endast baseras på storlek på batteriet och möjligheten att vid varje tillfälle kunna ladda fullt, kommer linjer och omlopp med detta mönster inte vara lämpliga. Skulle ett större batteri användas, med tillräcklig kapacitet för att klara av ofullständiga laddningstillfällen, öppnar det upp möjligheten för ändhållplatsladdning för flera linjer. Det bidrar även till ökad flexibilitet då en större batterikapacitet ökar sannolikheten för att bussen kan trafikera även andra turer och omlopp.

Ett överdimensionerat batteri kan anses onödigt kostsamt men det behöver inte vara fallet. Då en

¹⁹Med drop-in-biodrivmedel menas här ett biodrivmedel som kan användas i befintliga förbränningsmotorer utan anpassning.

omlopp sällan trafikeras av samma buss varje dag är det av intresse att bussar kan trafikera olika omlopp. Med ett större batteri följer längre räckvidd vilket ger bussen möjlighet att trafikera fler omlopp och linjer. Vad en sådan ökning i flexibilitet är värd kan vara svårt att svara på men med tillgång till de schemalägningsverktyg som bussoperatörerna har kan olika scenarier jämföras mot varandra. Då båda alternativen är tekniskt möjliga slutar det i en ekonomisk avvägning – vad kostar det om busstrafiken kräver fler bussar jämfört med vad det kostar att använda större batterier?.

6.1 Energianvändning

När det gäller den dimensionerande energianvändningen är det klokt att utgå från ett worst case-scenario. Kostnaden det innebär att dimensionera efter ett worst case ska ställas mot kostnaden för eventuella extrabussar under problemperioder, kostnaden för att inte kunna uppfylla resenärernas behov samt en uppskattning av hur många dagar per år som kräver en ökad energianvändning. Detta är något som bör bli lättare att ta ställning till när fler elbussar är ute i trafiken och data kring körningarna finns tillgänglig. Det är däremot inte den energianvändning som bör användas när de årliga kostnaderna för energi ska beräknas, alltså den energi som bussoperatören ska betala för. Den faktiska energikostnaden stämmer bättre överens med snittanvändningen och kommer ge en mer rättvis prisbild. Energikostnaden inkluderar förutom bussens energianvändning, förluster i laddstationen och i batteriet. Data för snitt energianvändningen för en 18-meters led buss i Sverige har inte funnits tillgängligt i detta arbete. Däremot visar erfarenheter från Barcelona att en led buss drar cirka 2,2 kWh/km ZeEus, 2017 och samtal med RISE Viktoria²⁰ antyder att en snittenergianvändning mellan 2,1 och 2,5 kWh/km är rimlig.

6.2 Batteriets kapacitet

Batteriers energi kapacitet minskar med deras ålder och livslängden anses vara slut när batteriet har 80 % av den ursprungliga kapaciteten kvar. För att maximera livslängden bör energin i batteriet befinna sig inom det tillåtna SOC-fönstret. Slitaget som sker när batteriet laddas mer än den övre SOC-gränsen är tidsberoende²¹, vilket innebär att det är möjligt att ladda mer än SOC-fönstret vid tillfällen då bussen förväntas behöva extra kapacitet inom en snart framtid. Det är däremot viktigt att inse att möjligheten att göra detta kommer att minska med tiden då batteriets kapacitet minskar. Det betyder att det är tekniskt möjligt att utnyttja mer än 80 % av batterikapaciteten i början av batteriets livstid men att denna möjlighet försvinner med tiden. Hur detta kan nyttjas på bästa sätt är en avvägning mellan kostnaden för ökat slitage på batteriet och vinsten av den extra kapaciteten.

²⁰Joakim Nyman, Senior researcher, RISE Viktoria, 26/4 2019.

²¹Joakim Nyman, Senior researcher, RISE Viktoria, 26/4 2019.

6.3 Förslag till vidare studier

I beräkningsmodellen i denna studie antas laddningen av batteriet ske linjärt. I vidare studier bör den utvecklas för att ta hänsyn till den ned- och upprampning som är nödvändig för att inte skada batteriet. Detta skulle ge en mer verklighetstrogen bild av hur lång tid laddningen tar. Vidare studier kan göras kring det sammanlagda effektbehovet om flera pantografer skulle installeras och hur de sammanlagras med befintliga laster.

Dimensionering av batteristorlek har en relativt stor påverkan på den totala kostnaden för en elbussflotta. En överdimensionering av batteriet kan dock vara ekonomiskt lönsam till följd av den ökade flexibiliteten. En ökad flexibilitet minskar antalet fordon i bussflottan och leder till bättre resursutnyttjande. Vidare studier kring lönsamheten är därför av intresse.

Bussens energianvändning är en viktig parameter i dimensioneringen och i detta arbete har den baserats på tidigare studier och projekt. I framtida studier vore det intressant om data från bussar i trafik användes för att avgöra hur lämpligt 3 kWh/km är som worst case. Alternativt att det är möjligt att använda den faktiskt energianvändningen i modellen.

7 Slutsats

Denna studie visar att det finns olika tekniker (depåladdning, laddning under färd och tilläggladdning vid hållplatser) för att elektrifiera en bussflotta. Vilken teknik som lämpar sig bäst beror på vilket trafikarbete som ska utföras, hur elbussarna ska implementeras och lokala begränsningar i elnätet. Den här studien har fokuserat på tilläggladdning vid ändhållplatser. Då 'obegränsat' effektuttag från elnätet i dagsläget inte kan ses som en självklarhet är det viktigt att veta vilken anslutningseffekt som är tillgänglig i nätstationen kring ändhållplatserna i fråga.

Elbussarnas batterier bör dimensioneras efter vilka linjer de ska trafikera, och hur de implementeras påverkar flexibiliteten i bussflottan. Denna studie visar att om elbussar ska klara av att köra både linje 6 och linje 8 i Uppsala kommer det att krävas överdimensionerande batterier för bussarna som kör linje 6, på grund av att linje 8 är längre och därmed ställer högre krav på batterierna. Resultatet visar att trafiken på helger, speciellt för linje 8, är mer krävande än trafiken på vardagar. Dimensioneras batteriet istället för att köra all trafik på linje 6 men endast vardagar på linje 8 kan batteristorleken mer än halveras (260 kWh). Sammanlagt kan 12 bussar elektrifieras med ändhållplatsladdning på de både linjerna utan att påverka flexibiliteten för mycket.

Känslighetsanalysen visade att det dimensionerande scenariot vid 300 kW laddeffekt blir kortare laddtid snarare än missad laddning. Vid 500 kW laddeffekt var det istället den missade laddningen som var dimensionerande. Känslighetsanalysen visade även att stödladdning var mest effektiv vid laddning med 300 kW och att garanterad laddtid hade störst påverkan vid 500 kW laddeffekt.

Denna studie visar att det är möjligt att dimensionera batteriet för att klara av trafikarbetet med 300 kW laddeffekt. Med förluster i infrastrukturen och batteriet innebär det ett effektbehov från elnätet nära 350 kW. Under rådande kapacitetsbrist kan det tyckas motsägelsefullt att använda sig av laddning med hög laddeffekt. Men då laddningen sker utspritt över dygnet kan effekttopparna faktiskt vara mindre än för motsvarande antal depåladdade bussar. Resultatet från denna studie bör därför jämföras med effektbehovet vid depåladdning.

Referenser

Rapporter

- WSP (2016). *ELEKTRIFIERING AV BUSSAR I VÄSTMANLAND – POTENTIAL OCH EFFEKTER* Utredning om förnyelsebara energislag och fordon till myndighetens kollektivtrafik. Tekn. rapport. [Hämtad 11 feb 2019].
- WSP (2018a). *Framtidens kollektivtrafik i Västerås: Delprojekt 3 Elbussar*. Tekn. rapport. [Hämtad 6 mars 2019].
- WSP (2018b). *KOLLEKTIVTRAFIKENS BIDRAG TILL TRANSPORTSEKTORNS KLIMATMÅL*. Tekn. rapport. [Hämtad 21/5 2019].
- Aldenius, M., J. Khan och Alexandra Nikoleris (2016). *Elektrifiering av stadsbussar En genomgång av erfarenheter i Sverige och Europa*. Tekn. rapport. Lund Universitet.
- Andersson, Malin (2017). *Energy storage solutions for electric bus fast charging stations Cost optimization of grid connection and grid reinforcements*. Tekn. rapport. [Hämtad 6e maj 2017]. Uppsala Universitet.
- Beekman, R. och R. van den Hoed (2016). *Operational demands as determining factor for electric bus charging infrastructure*. Tekn. rapport, s. 1–6. DOI: 10.1049/cp.2016.0963.
- ElectriCity (2016). *Samarbete för en hållbar och attraktiv kollektivtrafik*. Tekn. rapport.
- Energiforsk (2017). *SNABBLADDNING AV ELBUSSAR I DISTRIBUTIONSNÄT*. Tekn. rapport. [Hämtad 6 mars 2019].
- Franca, Anaissia (2015). *Electricity consumption and battery lifespan estimation for transit electric buses: drivetrain simulations and electrochemical modelling*. Tekn. rapport. B.Eng, University of Victoria, Department of Mechanical Engineering.
- Gamla Uppsala Buss (2018). *Årsredovisning och koncernredovisning för räkenskapsåret 2018*. Tekn. rapport.
- IVA, Kungl. Ingenjörsvetenskapsakademien (2016). *Sveriges framtida elnät - en delrapport*. Tekn. rapport.
- Karlsson, Elin (2016). *Charging infrastructure for electric city buses*. Master Thesis. Kungliga tekniska högskolan.
- Lajunen, Antti (2017). *Lifecycle costs and charging requirements of electric buses with different charging methods*. Tekn. rapport.
- Lindberg, Maria (2016). *Elkvalitet och störningar i samband med laddning av kommunens elbussar på laddningsplatserna Röbbäck och Carlshöjd*. Tekn. rapport. Umeå Universitet.
- Lindgren, Lars (2015). *Full electrification of Lund city bus traffic - A simulation study*. Tekn. rapport. Department of Industrial Electrical Engineering och Automation, Lund Institute of Technology.
- Lindgren, Lars (2017). *Electrification of city bus traffic - a simulation study based on data from Linköping*. Tekn. rapport. Division of Industrial Electrical Engineering och Automation Faculty of Engineering, Lund University.
- Naturvårdsverket (2017). *Med de nya svenska klimatmålen i sikte: Gapanalys samt strategier och förutsättningar för att nå etappmålen 2030 med utblick mot 2045*. Tekn. rapport. [Hämtad 21 maj 2019]. Naturvårdsverket.

- Nyman, Joakim m. fl. (2017). *A user-friendly method to analyze cost effectiveness of different electric bus systems*. Tekn. rapport.
- Pihlatie, Mikko m. fl. (2014). *Fully electric city buses - The viable option*. Tekn. rapport. IEEE International Electric Vehicle Conference,
- Rogge, Matthias, Sebastian Wollny och Dirk Uwe Sauer (2015). *Fast Charging Battery Buses for the Electrification of Urban Public Transport—A Feasibility Study Focusing on Charging Infrastructure and Energy Storage Requirements*. Tekn. rapport.
- Sinhubera, Philipp, Werner Rohlfsa och Dirk Uwe Sauera (2012). *Study on Power and Energy Demand for Sizing the Energy Storage Systems for Electrified Local Public Transport Buses*. Tekn. rapport. [Hämtad 6 maj 2019]. Electrochemical Energy Conversion m. fl.
- Svensk Kollektivtrafik (2018). *Årsrapport 2018: Kollektivtrafikbarometern*. Tekn. rapport. [Hämtad 21 maj 2019]. Naturvårdsverket.
- Svenska Kraftnät (2017). *Systemutvecklingsplan 2018 - 2027*. Tekn. rapport. Svenska kraftnät.
- Trafikförvaltningen SLL (2017). *Information om utredning Övergång till eldriven busstrafik i Stockholms län*. Tekn. rapport.
- Trafikförvaltningen SLL (2019a). *PM Batteri Utredningsstudie: Övergång till eldriven busstrafik*. Tekn. rapport. [Hämtad 9 maj 2019].
- Trafikförvaltningen SLL (2019b). *PM Ekonomi Utredningsstudie: Övergång till eldriven busstrafik*. Tekn. rapport. [Hämtad 9 maj 2019].
- Trafikförvaltningen SLL (2019c). *Utredningsstudie: Övergång till eldriven busstrafik i Stockholms län*. Tekn. rapport.
- Xylia, Maria (2018). *Towards electrified public bus transport - The case of Stockholm*. Tekn. rapport. Kungliga Tekniska Högskolan.
- ZeEus (2017). *ZeEUS eBus Report 2 An updated overview of electric buses in Europe*. Tekn. rapport.

Hemsidor

- E. Rydegran, Energiföretagen (2019). *Svk presenterar lösning för ökad överföringskapacitet från norr till söder*. URL: <https://www.energiforetagen.se/medlemsnyheter/2018/september/svenska-kraftnat-presenterar-losning-for-okad-overforingskapacitet-fran-norr-till-soder/>.
- Elsäkerhetsverket (2015). *EMC och elkvalitet*. [Använd 11 mars 2019]. URL: <https://www.elsakerhetsverket.se/om-oss/vi-arbetar-med/tillsyn-och-marknadskontroll/EMC/EMC-och-elkvalitet>.
- Energiföretagen (2019). *Samling för nätkapacitet*. URL: <https://www.energiforetagen.se/medlemsnyheter/2019/april/samling-for-natkapacitet-samlade-stort-natverk/>.
- Energimarknadsinspektionen (2018). *Kapacitetsbrist och effektbrist - vad är vad?* [Använd 6 maj 2019]. URL: https://www.ei.se/sv/nyhetsrum/nyheter/nyheter-2018/kapacitetsbrist-och-effektbrist-vad-ar-vad/?utm_source=update%5C&utm_medium=email.
- Energimyndigheten (2015). *Elnätet*. [Använd 6 maj 2019]. URL: <http://www.energikunskap.se/sv/FAKTABASEN/Vad-ar-energi/Energibarare/Elektricitet/Elnatet/>.

- E.ON (2019). *Elnätet - hur fungerar det egentligen?* [Använd 16 april 2019]. URL: <https://www.eon.se/artiklar/elnaetet--hur-fungerar-det.html>.
- Jonsson, Yvonne (2018). *Prototypen som laddar bussen trådlöst*. [Använd 1 april 2019]. URL: <https://www.chalmers.se/sv/institutioner/e2/nyheter/Sidor/Prototypen-som-laddar-bussen-tradlost.aspx>.
- Lindblom, Maria (2018). *Uppsala har slagit i eltaket*. [Använd 21/5 2019]. URL: <https://www.unt.se/ekonomi/uppsala-har-slagit-i-eltaket-5155206.aspx>.
- Maasing, Ulo (2019). *Stora kostnadsökningar hotar för fossilfri busstrafik*. [Använd 21/5 2019]. URL: <https://www.bussmagasinet.se/2018/04/stora-kostnadsokningar-hotar-for-fossilfri-busstrafik/>.
- Malmö stad (2018). *Frågor och svar om elbussar*. [Använd 9 maj 2019]. URL: <https://malmo.se/Stadsplanering--trafik/Trafik--hallbart-resande/Nar-du-aker-kollektivt/Elbuss/Fragor-och-svar-om-elbussar.html>.
- Malmö stad (2019). *Linje 7 - Malmös första elbusslinje*. [Använd 9 maj 2019]. URL: <https://malmo.se/Service/Om-Malmo-stad/Sa-arbetar-vi-med.../Malmo-stads-miljoarbete/Elbuss.html>.
- Naturvårdsverket (2018). *Parisavtalet*. [Använd 23/5 2019]. URL: <https://www.naturvardsverket.se/Miljoarbete-i-samhallet/EU-och-internationellt/Internationellt-miljoarbete/miljokonventioner/Klimatkonventionen/Parisavtalet/>.
- Nobina (2018). *SNART ÅKER MALMÖBORNA MED SIN FÖRSTA ELBUSS*. [Använd 9 maj 2019]. URL: <https://www.nobina.com/sv/sverige/nyheter/snart-aker-malmoborna-med-sin-forsta-elbuss/>.
- Nohrstedt, Linda (2019). *Effektbehovet är den stora utmaningen*. [Använd 6 maj 2019].
- Region Uppsala (2019). *Region Uppsala som regional kollektivtrafikmyndighet*. [Använd 9 maj 2019]. URL: <https://www.regionuppsala.se/Kollektivtrafik1/Region-Uppsala-som-regional-kollektivtrafikmyndighet/>.
- SVT (2019). *Carina kör buss med dubbla täckbyxor*. [Använd 9 maj 2019]. URL: <https://www.svt.se/nyheter/lokalt/vasterbotten/carina-kor-buss-med-dubbla-tackbyxor>.
- UL (n.d.). *Miljö och hållbarhet*. [Använd 9 maj 2019]. URL: <https://www.ul.se/sidfot/om-ul/miljo-och-hallbarhet/>.
- Vattenfall (2019). *Ny anslutning*. [Använd 8 maj 2019]. URL: <https://www.vattenfalleldistribution.se/foretag/el-till-verksamheten/ny-anslutning/>.

Oppublicerat

- UL (2017). "Elektrifiering av stadsbusstrafiken i Uppsala - linjeval".