



CHALMERS



Eldrivna Expressbussar

Optimering och dimensionering av laddningsinfrastruktur samt bussbatteri över längre sträckor

Kandidatarbete inom maskinteknik

NIKLAS RECK
JOHAN RITTSTEN
DAVID SANDAHL

NIKLAS TORSTENSSON
ERIK WEIHS
LUISA ZLATOIDSKA

KANDIDATARBETE SSYX02-17-37

Eldrivna Expressbussar

Optimering och dimensionering av laddningsinfrastruktur samt
bussbatteri över längre sträckor



CHALMERS

Institutionen för Signaler och System
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2017

Eldrivna Expressbussar
Optimering och dimensionering av laddningsinfrastruktur samt bussbatteri över
längre sträckor

NIKLAS RECK
JOHAN RITTSTEN
DAVID SANDAHL
NIKLAS TORSTENSSON
ERIK WEIHS
LUISA ZLATOIDSKA

© NIKLAS RECK, JOHAN RITTSTEN, DAVID SANDAHL,
NIKLAS TORSTENSSON, ERIK WEIHS & LUISA ZLATOIDSKA, 2017.

Handledare: Anders Grauers
Examinator: Sébastien Gros, Signaler och System

Kandidatarbete SSYX02-17-37
Institutionen för Signaler och System
Chalmers Tekniska Högskola
SE-412 96 Göteborg

Framsida: Gul Express, ©Västtrafik.

Typeset in L^AT_EX
Göteborg, Sverige 2017

Sammanfattning

Den globala uppvärmingen är ett av de mest överhängande problemen i modern tid. Det har resulterat i utformandet av nya regelverk och globala klimatmål, vilket medfört en högre utvecklingstakt av miljövänliga fordonsalternativ. I Göteborg har klimatmålen bland annat mynnat ut i en grönare fordonsflotta för kollektivtrafiken där experiment med nya klimatsmarta bussar har genomförts. Busslinje 55 trafikeras delvis av helt elektrifierade bussmodeller. Det är nu av intresse att undersöka hur eldrivna bussmodeller klarar sig på längre sträckor. Dessa sträckor innehåller i regel vägar med höga hastigheter och denna rapport syftar till att undersöka möjligheten att utveckla en modell för elektrifiering av en expressträcka, med batterier och laddningsinfrastruktur.

I projektet gjordes avgränsningar gällande modellering, ekonomi, elförsörjning samt miljö. Därefter påbörjades en litteratursökning om befintliga tekniker och en grundläggande modell skapades för bussen. Indata till simuleringen togs från en verklig körcykel där kördata samlades in från Blå Express. En modell av bussen skapades i *Matlab Simulink* där hela körcykler kunde simuleras med laddning och laddarplacering för att undersöka batteriets beteende. För att optimera laddarplacering, antal laddare och batteristorlek användes MILP (Mixed Integer Linear Programming). Detta gjordes för att hitta olika scenarion som skulle passa sträckan och som gav lägst kostnader. Projektet resulterade i fyra förslag på olika system som skulle kunna användas för att elektrifiera Blå Express. Dessa förslag innefattade scenarion med både elväg och laddare, samt olika batteristorlekar. Ett system bestående av två ändhållplatsladdare med hög effekt blev det klart billigare alternativet om extra-kostnaderna för chaufförer exkluderas, jämfört med en elväg. Däremot blev elvägen en mer tilltalande lösning när förarkostnader tillkommer i beräkningarna, eftersom detta är en kraftigt bidragande faktor till systemets totalkostnad.

Abstract

Global warming is one of the most imminent problems in modern times. This has resulted in stricter environmental regulations, which in turn have yielded an accelerated development in environmentally-friendly vehicle alternatives. In Gothenburg the climate crisis has, among other things, sparked an interest in a more environment conscious public transport. Experiments with buses driven by renewable energy have been carried out. Busline 55 is operated in part by fully electrified bus models. However, the current models are operated in a city-environment and it is therefore of interest to investigate whether electric bus models can handle expresslines. This report aims to investigate these routes, since they are usually more demanding, with batteries and charging infrastructure.

To make this project possible some limitations had to be adopted in the modelling, economy, electrification and environmental aspects. After this, a literature study was conducted to get an overview of existing techniques. Also, a basic model of the bus was constructed. To make a simulation possible, data was collected from Blå Express to get a reality based result. A model was later built in *Matlab Simulink* where the driving cycle could be simulated with charging stations and their placement. This made it possible to examine how the battery reacted for different changes in the system. Linear programming was utilized in order to optimize the charger positions on the route, the number of chargers and battery size. In this case, MILP (Mixed Integer Linear Programming), was used to find different cases that suited the route with regard to economic aspects. The project resulted in four proposals for different systems that could be used to electrify Blå Express. These proposals included scenarios with both electric roads and chargers, as well as different battery sizes. A system consisting of two high power end stop chargers was clearly the cheaper option if additional driver cost was excluded, compared to a electric road. On the other hand, the electric road became a more appealing solution when driving costs are included in the calculations, as this is a major contributing factor to the total cost of the system.

Notationer

Särskilda Mängder

Symbol	Beskrivning
$\mathbb{R}$	Reella tal
$\mathbb{R}_+$	Ickenegativa reella tal
$\mathbb{Z}$	Heltal
$\mathbb{Z}_+$	Ickenegativa heltal

Modellparametrar

Symbol	Beskrivning	Enhet
F_a	Bussens acceleration	N
F_{drag}	Luftmotståndet	N
F_g	Gravitationskraften	N
F_{rull}	Rullmotståndet	N
F_{tot}	Totala kraftbidraget	N
C_d	Luftmotståndskoefficienten	N
C_r	Friktionskoefficienten	N
m	Bussens massa	kg
r_b	Busshjulens radie	m
r_j	Jordens radie	m
A	Bussens frontarea	m ²
v	Bussens hastighet	m/s
g	Gravitationskonstanten	m/s ²
ρ	Luftdensiteten	kg/m ³
T_{hjulaxel}	Hjulaxelns vridmoment	Nm
ω	Bussens varvtal	rpm
G	Utväxling hjul/motor	-
P	Effekt	W
E	Energiåtgång	Ws
α	Vinkel mot horisontalplanet	°
λ	Longitud	°
θ	Latitud	°

Optimeringsparametrar

Symbol	Beskrivning	Enhet
--------	-------------	-------

C_{batt}	Batterikostnad per år	SEK/år
c_{batt}	Batteriets kostnad per kWh	SEK/kWh
$c_{\text{a,batt}}$	Batteriets kostnad per kWh och år	SEK/kWh·år
$C_{\text{elväg}}$	Elvägens kostnad per år	SEK/år
$c_{\text{elväg}}$	Elvägens kostnad per km	SEK/km
$c_{\text{a,elväg}}$	Elvägens kostnad per km och år	SEK/km·år
C_{ladd}	Laddarens kostnad per år	SEK/år
c_{ladd}	Laddarens kostnad per kW	SEK/kW
$c_{\text{a,ladd}}$	Laddarens kostnad per kW och år	SEK/kW·år
c_0	Initialkostnad för laddstolpe	SEK
E_{ladd}	Uppladdad energi vid en hållplats	kWh
$E_{\text{före}}$	Batterinivån före bus- sen har laddats vid en hållplats	kWh
E_{efter}	Batterinivån efter bussen har laddats vid en hållplats	kWh
E_{kons}	Energikonsumtionen mellan två hållplatser	kWh
N_{buss}	Antal bussar	st
N_{cykel}	Antal cykler per dag	st
N_{hp}	Antal hållplatser längs linjen	st
N_{ml}	Antal mellanladdare längs linjen	st
$P_{\text{max,elväg}}$	Maximal effekt för elväg	kW
P_{max}	Maximal batterikapa- citet	kW
P_{ml}	Effekt för mellanlad- dare	kW
$P_{\text{änd}}$	Effekt för ändhåll- platsladdare	kW

SoC	Batteriets energinivå (State of Charge)	%
$SoC_{\text{ög}}$	Övre begränsningen för batteriets använd- ningsområde	%
SoC_{lg}	Lägre begränsningen för batteriets använd- ningsområde	%
T_{ladd}	Uppehållstiden vid en hållplats	s
$T_{\text{elväg}}$	Tiden som bussen laddas av elvägen	s
T_{hp}	Uppehållstiden vid en mellanhållplats	s
$T_{\text{änd}}$	Uppehållstiden vid en ändhållplats	s

Kostnadsparametrar

Symbol	Beskrivning	Enhet
$C_{\text{chaufför}}$	Extrakostnad för bus- soperatör	SEK
$c_{\text{chaufför}}$	Timkostnad för bus- soperatör	SEK
C_{tot}	Totalkostnad för sy- stemet	SEK
k	Kalkylränta	-
$s_{\text{elväg}}$	Elvägens sträcka	km
T_{cykel}	Extratiden bussen står still per cykel	h
$T_{\text{chaufför}}$	Totala extratiden för alla bussars chauffö- rer på ett år	h
λ_1	Kostnadssegment 1	-
λ_2	Kostnadssegment 2	-

Variabler

Symbol	Beskrivning	Enhet
x_i	Laddningskapacitet för en laddare vid hållplats i	kW
x_{batt}	Batterikapaciteten	kWh
x_{init}	Initialenergi för bat- terierna	kWh
n	Antal år	år

Innehållsförteckning

Sammanfattning	iv
Abstract	v
Notationer	vi
1 Inledning	1
1.1 Syfte	1
1.2 Problembeskrivning	1
1.2.1 Om Blå Express	2
1.3 Avgränsningar	4
1.3.1 Drift av systemet	4
1.3.2 Modellering	4
1.3.3 Ekonomi och kostnader	4
1.3.4 Elförsörjning av systemet	4
1.3.5 Miljö	4
2 Metod	5
2.1 Litteratursökning	5
2.2 Modellering	5
2.3 Datainsamling	6
2.4 Simulering	7
2.5 Optimering	7
2.6 Kostnadsanalys	7
2.7 Verifiering och analys	7
2.7.1 Känslighetsanalys	7
3 Teori	8
3.1 Utvecklingen av elbussar	8
3.2 Befintlig teknik för elöverföring till bussar	9
3.2.1 Konduktiv laddning	9
3.2.2 Induktiv laddning	11
3.2.3 Batteribytesstationer	12
3.2.4 Batteridrift	12
3.3 Modell av bussen	14
3.3.1 Fordonsmodell	14
3.3.2 Utväxling mellan hjulaxel och motor	15
3.3.3 Motor	15
3.3.4 Batteri	16
3.3.5 Förlustberäkningar	16
3.3.6 Klimatanläggning	17
3.3.7 Laddning	17
3.3.8 Haversineformeln	17
3.3.9 Bearbetning av mätdata	18

3.4	Mixed-Integer Linear Programming	18
3.4.1	Branch and Bound	19
3.5	Annuitetsmetoden	19
4	Genomförande	20
4.1	Datainsamling	20
4.2	Målfunktion för kostnadsoptimering	21
4.2.1	Linjära begränsningar	22
4.3	Linjär kostnadsmodell för laddare och elväg	23
4.4	Modellering av en busslinje för MILP	24
4.5	Optimering av busslinje	28
4.6	Simulering	28
4.7	Kostnadsberäkningar	29
4.8	Känslighetsanalys	29
5	Resultat	30
5.1	Körcykel	30
5.2	State of charge	32
5.3	Optimering och simulering	33
5.3.1	Alternativ 1 - Ändhållplatsladdning 4 min	33
5.3.2	Alternativ 2 - Ändhållplatsladdning 6 min	34
5.3.3	Alternativ 3 - Ändhållplatsladdning 8 min	35
5.3.4	Alternativ 4 - Elväg	36
5.4	Kostnadssammanställning	37
5.5	Känslighetsanalys	37
6	Diskussion	39
6.1	Körcykel	39
6.2	Kraftjämvikt	39
6.3	State of Charge	40
6.4	Optimering och simulering	40
6.5	Kostnadssammanställning	40
6.6	Laddteknik och lagring av energi	41
6.6.1	Batteri	41
6.6.2	Konduktiv laddning	42
6.6.3	Induktiv laddning	42
6.6.4	Batteribytesstation	42
6.7	Känslighetsanalys	43
6.7.1	Modellparametrar	43
6.7.2	Kostnadsparametrar	43
6.8	Miljö	44
6.9	Elbussars framtid	45
6.9.1	Självkörande bussar och dess påverkan på priset	45
7	Slutsats	46
8	Förslag på fortsatt arbete	47

Referenser	48
Bilagor	I
A Bussmodell i simulink	I
B Övriga laddningsalternativ	II
C Känslighetsanalys	III

1 Inledning

I dagens samhälle är ett av de största globala problemen det stundande miljöhotet. Jordens befolkning fortsätter kontinuerligt att öka och i takt med detta uppstår ett transportbehov som behöver tillfredställas med en kostnadseffektiv och miljövänlig form av transportmedel. I Sverige ökar användningen av kollektivtrafiken stadigt [1], vilket leder till att behovet av mer miljövänliga transportalternativ växer. En minskning av kollektivtrafiken är inte en rimlig lösning, eftersom Sverige till hög grad är urbaniserat [2]. Detta innebär att städerna växer och kollektivtrafiken således blir viktigare för att ta sig runt i vardagen. Utsläpp från tunga transporter har exempelvis ökat med cirka 20 % mellan 1990 och 2013 [3]. Ett av Västra Götalands mål till år 2025 är att minst 95 % av kollektivtrafiken ska drivas med förnybar energi. Redan år 2020 skall 90 % av kollektivtrafiken drivas med förnybar energi och dessutom skall samtliga fordon vara fossiloberoende [4].

Den genomsnittlige göteborgaren förbrukar 1 ton koldioxid per år enbart vid bilkörning [5], vilket ungefär motsvarar 1/8 av individens genomsnittliga totala utsläpp. Göteborgs miljömål till år 2050 är att Göteborg skall ha en hållbar och rättvis utsläppsnivå av växthusgaser. Detta innebär att koldioxidutsläppen per person och år bör hållas på mindre än 2 ton. Enligt dagens prognoser kommer detta bli en mycket svår målsättning att uppnå. Målet om att förändra kollektivtrafiken mot en mer fossilfri fordonsflotta till 2025 räcker inte för att nå det långsiktiga heltäckande målet. Det kommer därför krävas att stadens invånare använder kollektivtrafiken i större utsträckning än tidigare för att åstadkomma en signifikant förändring [5]. En eldriven lösning som ersättare till problemet med de fossildrivna fordonen som utgör majoriteten av trafiken idag är därför tilltalande. Elbussar är en fordonstyp som på senaste tiden har varit på snabb frammarsch, de första helt elektriska busslinjerna har redan tagits i bruk och många företag satsar mycket på ta fram nya elbussar [6]. Även många städer runt om i världen har ambitiösa miljömål gällande kollektivtrafiken där elbussar ingår som en delösning eller heltäckande lösning för att nå de lokala miljömålen [7].

1.1 Syfte

Syftet med detta arbete är att dimensionera och simulera ett antal fungerande totalsystem för elektrifiering av en expressbusslinje. Detta innebär simulering av en längre sträcka som sträcker sig över både motorväg, landsväg samt i stadstrafik. I begreppet totalsystem ingår bussen, förare, hållplatser, drivsystem samt energiöverföring. Denna rapport har även som syfte att ta fram en kostnadsuppskattning för nämnda totalsystem.

1.2 Problembeskrivning

Eftersom det redan förekommer elbussar i drift skall projektet undersöka möjligheten att tillämpa denna relativt nya teknik på längre sträckor, eftersom dagens driftlösningar endast klarar av kortare sträckor utan laddning. I slutändan ska detta mynna

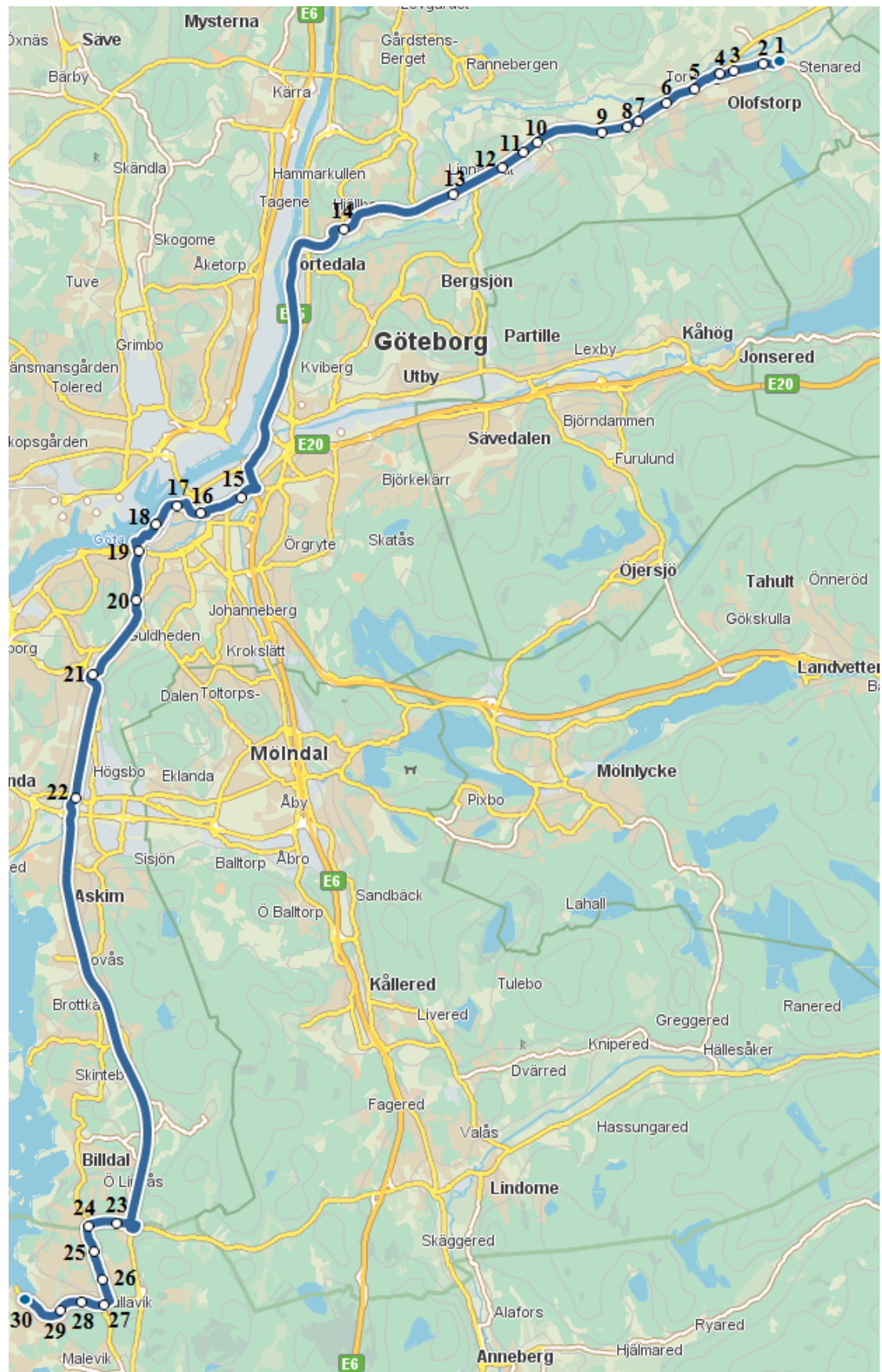
ut i en teknisk lösning för att elektrifiera en av expressbusslinjerna trafikerade av Västtrafik i Göteborg. Här har Blå Express valts eftersom den har en varierande körsträcka bestående av både stads-, landsvägs- och motovägstrafik, samt en växlande topografi.

Projektet kommer i huvudsak bestå av följande uppgifter:

- Undersökning och utvärdering av existerande energiöverföringstekniker och möjligheten att tillämpa dessa på expresslinjen.
- Utforma en lösning som passar den valda rutten.
- Dimensionera och kostnadsoptimera systemets komponenter som bussbatteri, avstånd mellan laddningsstationer och elväg.
- Simulering av en dags trafik för en buss på expresslinjen. Detta visualiseras med en matematisk modell som skapas och simuleras i *Matlab Simulink*.

1.2.1 Om Blå Express

Blå express är en av de längre busslinjerna genom Göteborg. Bussarna trafikerar sträckan mellan Stenared och Kullaviks hamn. Sträckan uppmäter en total längd på cirka 45 km och körtiden är cirka 1 timme och 15 minuter. Bussen passerar hållplatsen *Svingeln* var 4:e minut i högtrafik. Bussmodellerna som trafikerar sträckan är bland annat Volvo 8900 [8].



Figur 1: Körsträckan för Blå Express med hållplatser utmarkerade längs med linjen

1.3 Avgränsningar

För att effektivt hantera information som inhämtas från litteratur och andra befintliga informationskanaler avgränsas projektet i olika avseenden. Dessa avgränsningar involverar bland annat systemdrift, modellering, ekonomiska aspekter, elförsörjning och miljöfrågor.

1.3.1 Drift av systemet

Projektet behandlar endast eldrift av Blå Express, men undersöker även lösningar som i dagsläget finns för lastbilar och personbilar, för att kunna implementera dessa även på bussar. Vidare diskuteras olika alternativ angående transportsträckan, huruvida bussen skall drivas genom konduktiv/induktiv laddning eller om den skall vara försedd med ett batteri som laddas under eller mellan turerna med laddningsstolpar. I projektets avgränsningar ingår inte heller någon analys eller kostnadsjämförelse för underhåll på elbussar respektive konventionella bussar.

1.3.2 Modellering

Bussens utförande genomgår ingen optimeringsprocess och därmed kommer bussen modelleras som ett block. Ingen hänsyn till förbättringspotential kring aerodynamiska egenskaper kommer med andra ord att tas, det är endast drivlinan som ändras i jämförelse med dagens bussar. Klimatanläggningens inverkan på energiförbrukningen för olika lång ändhållplatsladdning beaktas inte.

1.3.3 Ekonomi och kostnader

Kostnaden för dagens dieselbussar och plug-in hybrider kommer inte beräknas, även kostnader för chaufförskostnad och el bortses från. Byggkostnader och anslutningskostnader anses vara lika stor för alla laddningsstolpar och är medräknat i initialpriset. Samtliga priser och kostnader utgår från dagsläget och enbart grova uppskattningar av eventuella prisförändringar kommer att behandlas. Enbart den eventuella extrakostnaden som det innebär att stå stilla och ladda bussen beräknas.

1.3.4 Elförsörjning av systemet

Projektet förutsätter att erforderlig effekt finns tillgänglig och matas från det befintliga elnätet. Övrig påverkan berörs endast översiktligt och det kommer inte utföras några beräkningar som avser påverkan på elnätet.

1.3.5 Miljö

Analys av miljöpåverkan, trafikbuller samt potentiella konsekvenser en elektrifiering av Göteborgs busstrafik skulle medföra behandlas översiktligt i rapporten. Det gäller även för påverkan på stadens infrastruktur och utsläppsgränser, eftersom huvudfokus ligger på simuleringen och val av driftmetod. Någon livscykelanalys kommer inte att genomföras.

2 Metod

Detta avsnitt behandlar metodiken för projektets olika processer i kronologisk ordning. Det inkluderar både planering och genomförande, där de huvudsakliga stegen innefattar

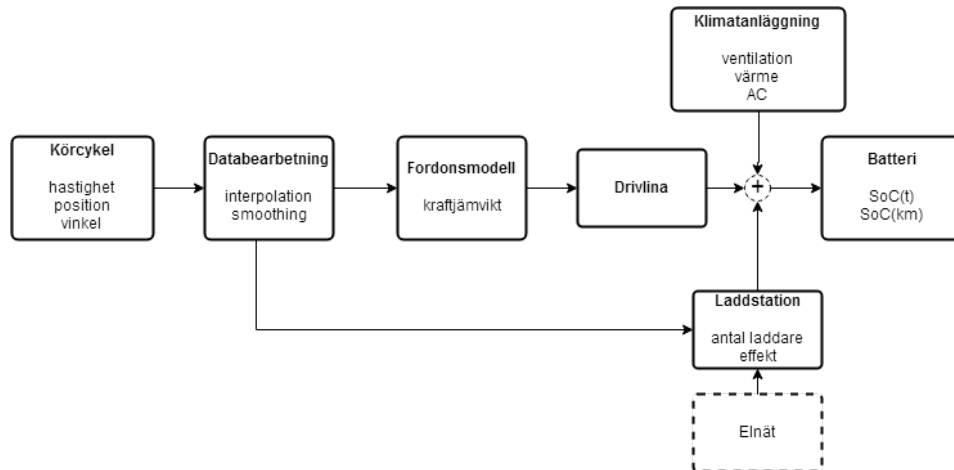
- Litteratursökning
- Modellering
- Kostnadsoptimering
- Simulering
 - Laddningsnivå batteri (*SoC*)
 - Laddarplacering
 - Dimensionering av bussbatteri
- Verifiering och analys
 - Känslighetsanalys

2.1 Litteratursökning

Initialt diskuterades projektets mål och planering, för att bilda en uppfattning om uppgiften studerades litteratur relevant för området. Dessutom fördes en dialog kring informationskanaler och deras trovärdighet med handledaren. De olika tekniska lösningar som finns för energiöverföring undersöktes utifrån befintlig teknik i drift eller i planeringsstadiet. Fysikaliska samband som behövdes för att bygga upp den planerade modellen är väl etablerad i litteraturen men information om den specifika busslinjen behövde inhämtas från bussbolaget. Det som huvudsakligen eftersöktes i litteratursökningen var hur tekniker användes i dagsläget samt vilka som fortfarande är under utveckling. Detta gav en bred grund och god förståelse för bussmarknaden och vilka tekniska lösningar som dominerade.

2.2 Modellering

En översiktlig modell av bussen skapades och de viktigaste delarna sattes i relation till varandra. I den togs hänsyn till körcykel, fysik, drivlina och batteri, men även förluster i klimatanläggning och laddningsstationer. En schematisk modell illustreras i figur 2.



Figur 2: Schematisk skiss över modellen

- **Körcykel** - Eftersom busslinjens sträcka och topografi påverkar bussens kör-
cykel behövde denna uppmätas då den bidrar till energiförbrukningen.
- **Fordonsmodell** - Den grundläggande fysiken och de matematiska samban-
den som behövdes för att kunna modellera en elektrifierad buss under en dags
körning studerades och delades upp i mindre delar. Här ingick luftmotstånd,
friktions-, gravitations- och accelerationskrafter.
- **Elektrisk drivlina** - Denna beskriver bussens drivlina, där approximativa
förluster beräknas.
- **Batteri** - En modell av batteriet upprättades och kopplades ihop med energi-
behovet från bussmodellen och körcykel för att simulera batteriets energinivå.
Denna användes vidare för att undersöka batteriets beteende och för optime-
ringen av batteristorleken.
- **Klimatanläggning** - Modellen krävde också en uppskattning av bussens kli-
matanläggning, eftersom den är kraftigt temperaturberoende och därför drar
mycket effekt under vissa väderförhållanden.
- **Laddstation** - För att skapa en verklighetstrogen modell implementerades
även laddstationer i modellen, så simuleringen kunde visa hur bussbatteriet
laddas under turen.

2.3 Datainsamling

För att en verklighetstrogen körcykel till simuleringen genomfördes en datainsam-
ling. Busslinjen följdes flera gånger med Volvos app *Route Recorder* som användes för
att logga turerna. Appen gav goda mätvärden med cirka 1 sekunds intervall. Even-
tuellet brusig mätdata kan leda till orealistiska effektvärden när det direkt användes
i simuleringen, därför kurvanpassades körcykeln innan simuleringen.

2.4 Simulering

För att uppskatta en buss energiförbrukning konstruerades och implementerades den matematiska modellen i *Matlab Simulink*. Modellen byggdes upp av undersystem som modellerade olika delar i systemet. Dessa består av de krafter som verkar på bussen. Systemets slutgiltiga utsignal beräknar bussens effektförbrukning i kW längs linjen, vilken senare kopplades till modellen för batteriets energinivå. Detta gav en första uppskattning av batteriets storlek. Mängden energi som går att återföra till systemet genom bromskraftsåtervinning undersöktes. Vidare finns modellens grundläggande ekvationer uppskrivna och förklarade i teoriavsnittet.

2.5 Optimering

Då projektet skulle resultera i en elektrifiering av Blå Express i Göteborg innefattade detta en optimering av laddarplacering och batteristorlek med avseende på kostnad. För att optimera busslinjen behövdes därför en kostnadsmodell tas fram som berodde på bussens energiförbrukning längs sträckan. Linjärprogrammering användes för att erhålla ett resultat med hjälp av linjära ekvationer och begränsningar. Här testades olika scenarion för att ge underlag till en analys av resultatet.

2.6 Kostnadsanalys

Eftersom kostnaderna för batteri och laddare hade olika livslängd tillämpades annuitetsmetoden för att göra dem jämförbara. Den totala kostnaden av olika scenarion jämfördes sedan i en analys.

2.7 Verifiering och analys

Resultatet från simuleringen granskades och jämfördes med dagens förbrukning och möjligheter att jämföra energiförbrukning med busslinje 55 och nuvarande Blå Express undersöktes.

2.7.1 Känslighetsanalys

En känslighetsanalys utfördes också för att undersöka hur olika parametervärden påverkar slutresultatet.

3 Teori

I följande teoriavsnitt beskrivs de tekniska områden och metoder som ligger till grund för modelleringen av bussystemet, samt optimeringsprocessen. Kapitlet är strukturerat som sådant att bakgrundsinformation beträffande drift och laddningsmetoder beskrivs inledningsvis. Detta följs sedan av ett systemavsnitt som behandlar den fysikaliska modellen, simuleringen samt modellerna som ligger till grunden för optimeringsarbetet.

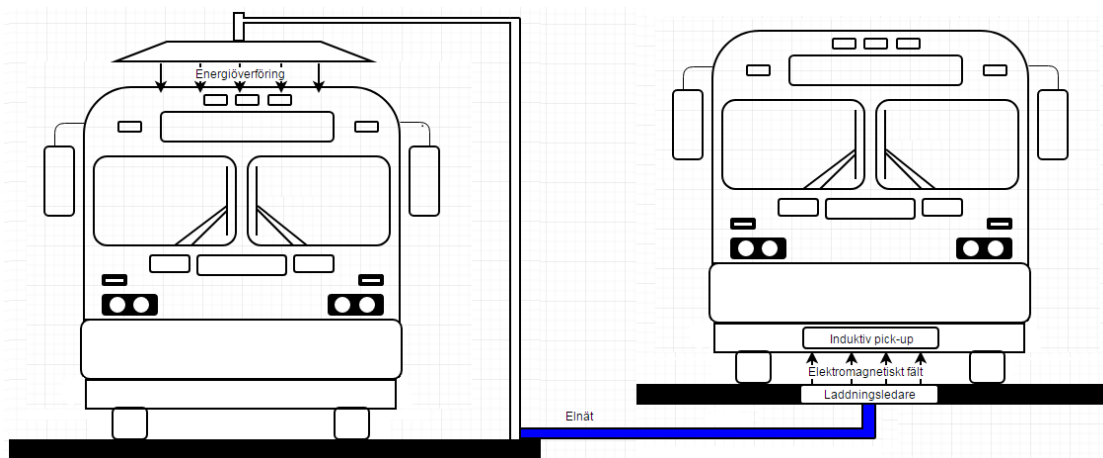
3.1 Utvecklingen av elbussar

Utvecklingen av elbussar har varit långsam, förutsättningarna och kunskapen har funnits men dålig lönsamhet har komplicerat utvecklingen för tillverkare. Svårigheterna ligger bland annat i att det inte finns några gemensamma riktlinjer för vem som skall finansiera den elektrifierade kollektivtrafiken i Sverige. Detta är av betydelse eftersom det innebär en hög engångskostnad för bussbolagen [9]. Fordonstillverkare har istället fokuserat på utveckling av eldrivna personbilar eftersom det finns högre efterfrågan på marknaden. Detta beror till stor del på supermiljöbilspremien som gemene svensk medborgare kan dra nytta av [10] samt det växande miljöintresset hos befolkningen.

Efter många år av utvecklingsarbete har tillverkarna löst de flesta tekniska svårigheterna och batteritekniken har således börjat sjunka i pris [11]. Den tekniska och ekonomiska utvecklingen tillsammans med strängare miljökrav har påskyndat utvecklingen av elbussar rejält under de senaste åren. Nya modeller lanseras ständigt och många nya elbilar börjar bli tillräckligt konkurrenskraftiga för att utgöra ett påtagligt alternativ till bilar drivna med förbränningsmotor. Detta har resulterat i slutsatsen att bussar lämpar sig utmärkt för elektrifiering med batterier. Den nya utvecklingen har gjort att olika intressenter satt press på att tillverkarna skall utarbeta nya modeller och koncept, men den kraftiga efterfrågan har medfört att tillverkarna inte hunnit utveckla passande lösningar för alla typer av busslinjer. En stor utmaning för branschen är att elektrifiera bussar som klarar av att drivas under längre sträckor med större bussar, som exempelvis expressbusslinjer. Utöver de ovan nämnda fördelar med elektrifierade bussar bör även fördelarna med det minskade bullret i stadsmiljö nämnas. Under 2000-talet har bullernivåerna i städerna sakta men säkert ökat vilket har gjort att nya regler och lagar har uppkommit för att förhindra denna utveckling [12]. Detta regelverk kan tänkas skärpas i framtiden, eftersom bullernivåerna redan passerat långt över de etablerade riktlinjerna på många ställen i Göteborg [13].

3.2 Befintlig teknik för elöverföring till bussar

Eldriven kollektivtrafik, specifikt elbussar, finns i många olika utföranden. Med tiden har olika tekniklösningar växt fram, däribland trådbunden teknik, helt batteridrivna lösningar och kombinationer av dessa. De mest framträdande av dessa är konduktiv- och induktiv laddning, samt batteribytesstationer. Konduktiv elöverföring innebär oftast kraftförsörjning ovanför fordonet; exempel på detta är Göteborgs spårvagnsnät och det svenska järnvägsnätet. Induktiv laddning innebär att elöverföringen inte kräver en direktkontakt, tekniken använder sig istället av magnetiska fält för att inducera en ström i fordonet. Batteribytesstationer fungerar genom att växla batteri efter körningar; ett batteri laddas medan ett batteri är i drift. De två vanligaste laddningslösningarna illustreras i figur 3 nedan.



Figur 3: Exempelbilder över de vanligaste tekniklösningarna för kommersiella elbussar, konduktiv- respektive induktiv laddning

3.2.1 Konduktiv laddning

När man talar om konduktiv laddning avses framförallt två tekniker där laddningen antingen sker ovanför fordonet eller under fordonet. Strömvtagaren på fordonet är i direkt kontakt med det matande systemet, så ström flyter kontinuerligt till bussen. Det första och vanligaste sättet är att laddning sker via kontakt med en luftburen elledning ovanför fordonet. Andra alternativet är att ett släpande kontaktdon under fordonet som kopplas samman med ett elförande spår eller skena i vägen. Dessa tekniklösningar redovisas i figur 4 respektive figur 5.



Figur 4: Volvos laddningslösning Oppcharge för busslinje 55 i Göteborg

©Volvo Bussar AB. Alla rättigheter förbehålls.



Figur 5: Konduktiv laddning via spår i vägen, teknik utvecklad av Elways

©Elways AB. Alla rättigheter förbehålls.

3.2.1.1 Konduktiv laddning ovanifrån

Trådbundna elfordon, speciellt bussar är sedan länge en välkänd och etablerad teknik. Trådbussar användes i Göteborg (1940-1964), Stockholm (1941-1964) och ett exempel på moderna trådbussar finns i Landskrona där fordonen varit i drift sedan 2003. Trådbussar använder sig av samma princip som trådbundna spårvagnar. Fördelen med trådbussar jämfört med spårvagnar är att anläggningskostnaderna är lägre samt att framkomligheten i gatutrafik är något bättre[14]. Nackdelarna med att ha trådbunden trafik ligger i en minskad flexibilitet, exempelvis svårigheten att leda om sträckor vid vägarbete och risken för att strömavtagaren hoppar av vid ställen där flera linjer korsar varandra. För ökad mobilitet i vagnhallar och vid omläggningar av trafiksträckor finns versioner med integrerat batteri som ger bussarna möjligheten att köra korta sträckor utan trådar.

Den nyaste utvecklingen i området med elfordon som laddas från tråd är så kallade smarta elvägar. Tekniken innebär att vissa sträckor är utrustade med luftledning. Detta ger exempelvis lastbilar möjligheten att drivas med el istället för bränslemotorer. Konceptet är ännu inte färdigutvecklat för storskalig utbyggnad men mindre teststräckor har anlagts, däribland 2 km av E16 utanför Gävle där Scania testar konceptet. Anledningen till placeringen av elvägen i Gävle är att många tunga transporter kör mot hamnen i Gävle med tungt gods som exempelvis stål [15]. En smart elväg beräknas kosta ca 10-20 MSEK/km trådsträcka för båda riktningarna. Kostnaden beror på vilken typ av väg som elektrifieras, en väg med hastighetsbegränsning 50 km/h hamnar i det lägre prissegmentet medan en elväg uppåt 90 km/h kostar cirka 20 MSEK enligt [16]. Ett storskaligt projekt planeras i Los Angeles [17], där tanken är att bygga en elväg mellan hamnen och södra delen av staden. Detta är idag en sträcka på ungefär 32 km med stor andel tung trafik till och från hamnen. Eftersom hamnen är USA:s största och tar emot ungefär 40 % [18] av allt båtgods som når USA anses sträckan ideal för elektrifiering.

3.2.1.2 Konduktiv laddning från marken

Konduktiv laddning från marken liknar tekniklösningen i föregående avsnitt med konduktiv laddning via luften, konceptet är istället att laddningen sker genom ett släpande kontaktdon mot en nedsänkt skena i marken. Denna typ av system testas just nu mellan Arlandas fraktterminal och Rosersbergs logistikområde [19]. Sedan mars 2017 har enbart en 350 meter lång teststräcka byggts, hela sträckan motsvarar 10 km men tanken är att bygga en elektrifierad demonstrationssträcka på 2 km. Skenan som elektrifierar fordonet är uppdelad i 50 meter långa sektioner, där var femtonde meter sker en anslutning till kablar som löper parallellt längs vägen. Via sensorer regleras sedan elektrifieringen av skenan beroende på om något fordon befinner sig på den sektionen eller inte. Enligt projektet som byggs till Arlanda beräknas denna teknik kosta ungefär 8 MSEK/km. Största fördelen med detta system är att alla typer av fordon kan laddas eftersom höjden mellan asfalt och undersidan av fordonet är ungefär samma för alla fordon. Detta bidrar till att flera typer av fordon kan utnyttja elvägen och därigenom är det flera aktörer som delar på kostnaden och betalar för systemet. Systemet skapar inte heller några större visuella störningar i natur och miljö kring vägen jämfört med laddning via luften. Förespråkare av denna teknik hävdar även att sikten försämras från konduktiv laddning via luften vilket inte är fallet med markladdningen. Eftersom laddningen sker via marken är det viktigt att systemet bland annat kan motstå regn, snö, temperaturförändringar och smuts. Skenorna behöver även klara av tyngden från fordon som kör över skenorna vid exempelvis omkörningar.

3.2.2 Induktiv laddning

Den induktiva laddningen har fortfarande mycket utveckling kvar innan den kan användas kommersiellt. Metoden bygger på att laddning sker trådlöst, antingen när bussen står stilla eller vid färd. Detta är möjligt på grund av att både fordonet och laddkällan har magnetiska spolar som bildar ett magnetfält. Det möjliggör överföring av energi utan direkt kontakt mellan buss och matande system [20]. Det går emellertid inte att ladda på för stort avstånd och bör ske på ca 2 decimeter avstånd för att vara effektivt[16]. Detta sker bäst vid högfrekvent växelström, medan fordonet använder sig av likström, vilket gör att fordonets elsystem måste klara av likriktning. Verkningsgraden ligger på upp till 90% vid induktiv laddning och det finns system redan idag som realiserar detta. Det stora problemet i dagsläget är att klara säkerhetskraven samt undersöka hur laddningen påverkas av olika yttre omständigheter. Exempelvis bör man studera hur magnetfälten påverkar människors pacemakers eller vad som händer om något hamnar mellan marken och fordonet vid laddning. Tekniken kring induktiv laddning är idag inte särskilt utbredd och därmed finns inga exakta kostnader. I en studie [21] undersöktes vad det skulle kosta att elektrifiera sträckan Göteborg till Stockholm med just denna teknik. Studien räknade fram ett pris som landade på 63 MSEK/km eller ekvivalent cirka 28,2 miljarder SEK för hela sträckan. Summan inkluderade både byggandet av sträckan och installationskostnader. Kompletta kontrollsystem och betalningssystem för sträckan beräknades inte i studien.

3.2.3 Batteribytesstationer

Batteribytesstationer innebär att ett använt batteri byts ut mot ett fulladdat vid en dedikerad plats och därför sparar tiden det tar att ladda. Detta skulle kunna innebära att en andra part äger bytesstationerna och leasar ut batterier till bussbolagen [22]. Tekniken för batteribytten är fortfarande väldigt utvecklad eftersom de flesta modeller fortfarande i idéstadiet. Stationerna behöver dessutom utformas efter vilken sorts batteri som används och även laddtekniken som skall användas. Dock visar modellerna som undersökts stor potential, men det är mycket som måste utvecklas innan det är fullkomligt realiserbart [23].

3.2.4 Batteridrift

Fördelen med bränslefordon är möjligheten att röra sig fritt utan att vara bunden till speciella rutter. Trådbundna fordon begränsar denna frihet och lösningen på problemet är att driva fordonen med batteri istället för kablar. Denna teknik har utvecklats på senare tid men begränsas för tillfället av utvecklingen av batteriernas prestanda. Utvecklingen av batteridrivna fordon resulterar i fordon med allt längre räckvidd. Den amerikanska busstillverkaren Proterra tillverkar modeller med en räckvidd på 350 miles (cirka 560 km) [24]. Även Volvo satsar på elbussar och dessa trafikerar bland annat busslinje 55 i Göteborg, linje 73 i Stockholm och Innovationslinje 109 vid Hamburgs HOCHBAHN [25]. Räckvidden på moderna elbussar är inte lika lång som på bussar med förbränningsmotor, men genom strategiskt placerade laddningsstationer kan ett väl fungerande system byggas upp.

I dagsläget finns det flera olika sorters batterier på marknaden. Batteriets kapacitet bestämmer hur länge bussen kan köra utan att ladda och är det en viktig faktor när bussträckan skall elektrifieras. Vid både upp- och urladdning sker förluster, vilket leder till försämrad batterikapacitet vilket begränsar livslängden. De faktorer som brukar undersökas hos batterier är livslängd, prestationsförmåga, energidensitet, uppladdning och säkerhet.

- **Livslängd** - Beskriver hur länge batteriet håller i antingen laddcykler eller antal år som batteriet är brukbart. Det är fortfarande outforskat hur länge ett batteri kan hållas i drift, eftersom mycket av forskningen endast skett på personbilar. Som referens siktar elbilstillverkare på 10 års livslängd.
- **Prestationsförmåga** - Innebär hur bra batteriet fungerar med avseende på exempelvis väderlek och körcykler. En buss skall klara av att köra under varma sommarmånader såväl som i minusgrader under vintern. Detta kräver mycket produktutveckling eftersom batterier oftast är anpassade för antingen det ena eller andra scenariot.
- **Energidensitet** - Talar om hur mycket energi batteriet kan lagra, detta beskrivs ofta i Wh/kg.
- **Uppladdning** - Beroende på laddarinfrastruktur laddas batteriet på olika sätt och även laddningstiden varierar.
- **Säkerhet** - Olika kemiska sammansättningar är olika säkra i batterier. Den

största risken är om det uppstår termisk rusning, det vill säga en okontrollerad ökning av reaktionshastighet vid plötslig ökad temperatur. Detta kan i värsta fall leda till att batteriet fattar eld.

Då projektet behandlar bussar som kör längre sträckor kommer fokus att ligga på litiumjonbatterier, vilket är den sortens batteri som används i de flesta eldrivna fordon idag. På marknaden finns idag flera olika sorters litiumjonbatterier [26], nedan följer en lista på batterier med en kort beskrivning.

- **Litium-Nickel-Kobolt-Aluminium(NCA)** - Goda energilagringssmöjligheter men ganska dyra och osäkra ur säkerhetssynpunkt med stor chans för termisk rusning.
- **Litium-Nickel-Mangan-Kobolt(NMC)** - God allmän prestanda och används i många applikationer idag, framförallt elbilar.
- **Litium-Mangan-Spinell(LMO)** - Låg prestanda och har därför inte erhållit någon större spridning.
- **Litium-Titan(LTO)** - Håller länge och har hög säkerhet men är ganska dyra och har inte särskilt goda energilagringssmöjligheter.
- **Litium-Järn-Fosfat(LFP)** - Har god säkerhetsnivå men tenderar att urladdas av sig själv.

De olika batterisorterna har helt olika egenskaper och ingen av dem är helt överlägsen på alla områden. Batteritypen som används i busslinje 55 idag är *LFP* och även finns att tillgå på marknaden [27]. Utöver detta håller de en god säkerhetsnivå.

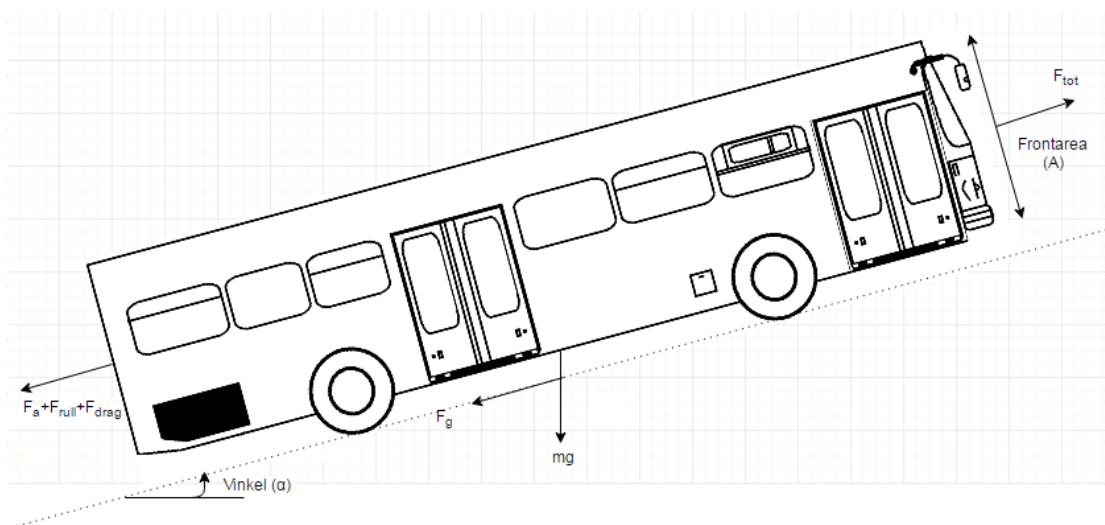
Då batterier är rätt dyra strävar man efter en så lång livslängd som möjligt. En bra avvägning mellan ekonomi och livslängd uppnås genom att hålla batterinivån en bit från maximal respektive minimal nivå. I den aktuella modellen hålls batterinivån mellan 25% och 75% under körning [28]. Under natten laddas batteriet fullt med lägre effekt under längre tid vilket är mer skonsamt för batteriet. Efter ett stort antal cykler kommer batteriet förlora kapacitet oavsett och för att få marginal kan batteriet därför behöva dimensioneras för det.

3.3 Modell av bussen

Bussenmodellen består av ett stort system med flera undersystem för fordon, drivlina och batteri. I figur 6 beskrivs de olika krafter som inverkar på bussmodellen. Detta stycke behandlar teori som behövs för att simulera modellen i *Matlab Simulink*.

3.3.1 Fordonsmodell

Fordonsmodellen utgår från bussens hastighet, acceleration och vägens lutning för att beräkna de krafter som påverkar bussen varpå dessa används för att beräkna ett vridmoment till drivlinan [29].



Figur 6: Krafter som verkar på bussmodellen när den kör i en lutning α

För att följa körcykeln måste bussens drivlina övervinna flera krafter, en av dessa är rullmotståndet som beräknas enligt

$$F_{\text{rull}} = C_r \cdot m \cdot g \text{ [N]} \quad (1)$$

där C_r är friktionskoefficienten, m är bussens vikt i kg och g är gravitationskonstanten. En annan bromsande kraft är luftmotståndet, som definieras enligt

$$F_{\text{drag}} = 0.5 \cdot \rho \cdot C_d \cdot A \cdot v^2 \text{ [N]} \quad (2)$$

och uppstår i bussens rörelse genom luften och beror bland annat på dess form. I huvudsak kan den beräknas med bussen frontarea av ekvation (2) där ρ är luftdensiteten, C_d är luftmotståndskoefficienten, A är bussens frontarea och v dess hastighet. Bussrutter har olika höjdprofiler, vilket innebär stigningar och backar. Detta ger upphov till en gravitationskraft

$$F_g = m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \text{ [N]} \quad (3)$$

där vinkeln α är vägens lutningen mot horisontalplanet, m är bussens massa och g är gravitationskonstanten. När bussen accelererar eller retarderar krävs även en kraft för att öka eller minska rörelseenergin. Den beskrivs enligt

$$F_a = m \cdot a \text{ [N]} \quad (4)$$

där a motsvarar bussens acceleration. Notera att denna kan växla mellan positiva och negativa värden beroende på bussens hastighet. Den totala kraften F_{tot} beräknas som

$$F_{\text{tot}} = F_{\text{rull}} + F_{\text{drag}} + F_g + F_a \text{ [N]} \quad (5)$$

ur vilken det går att utläsa bidraget från samtliga krafter som påverkar bussen. Med formeln för den totala kraften genereras motsvarande vridmoment enligt

$$T_{\text{hjulaxel}} = F_{\text{tot}} \cdot r_b \text{ [Nm]} \quad (6)$$

där T_{hjulaxel} är vridmomentet på hjulaxeln och r_b motsvarar hjulens radie.

Tabell 1: Värden på parametrar i fordonsmodellen

Fysikalisk storhet	Förkortning	Värde	Enhet
Rullmotståndskoefficient	C_r	0.01 [30]	-
Luftmotståndskoefficient	C_d	0.6 [30]	-
Yta bussfront	A	8.41 [31]	m^2
Luftens densitet	ρ	1.2 [32]	kg/m^3
Massa	m	24750 [31]	kg

3.3.2 Utväxling mellan hjulaxel och motor

Hjulaxels vridmoment, T som har fastställts vid tidigare beräkningar görs om till vridmomentet som elmotorn måste producera enligt formeln

$$T_{\text{motor}} = \frac{T_{\text{hjulaxel}}}{G} \text{ [Nm]} \quad (7)$$

där G är en bestämd utväxling som appliceras mellan hjulaxeln och motorn. Detta värde bestäms i samband med förlustberäkningarna under avsnitt 3.3.5. Vid olika tidpunkter i cykeln arbetar elmotorn vid ett visst varvtal, ω som krävs vid fortsatta beräkningar och fås enligt

$$\omega = \frac{v \cdot G}{r_b} \text{ [rad/s]} \quad (8)$$

3.3.3 Motor

Vridmoment och varvtal som verkar på motorn används i beräkningarna för att fastställa effekten som motorn måste producera. De båda in-variablerna är anpassade efter motorns kapacitet med hjälp av utväxlingen, där krävd effekt beräknas enligt

$$P_{\text{motor}} = \omega \cdot T_{\text{motor}} \text{ [W]} \quad (9)$$

3.3.4 Batteri

Simuleringen genererar varje sekund ett nytt värde för in-signalen till dess batterimodul. Detta in-värde är krävd effekt, P_{motor} till batterimodulen och växlar mellan ett positivt och negativt värde beroende på om bussen laddas eller är i drift. För varje nytt värde P_{motor} genereras även ett värde E genom integration enligt

$$E = \int_{t_1}^{t_2} P_{\text{motor}} dt \text{ [Ws]} \quad (10)$$

där värdet E representerar den totala energiåtgången på batteriet under simuleringen. Detta värde subtraheras från batteriets totala kapacitet vilket resulterar i den tillfälliga laddningen på batteriet.

3.3.5 Förlustberäkningar

Systemets effektivitet är av stor vikt vid realisering. Detta speciellt beträffande motorer, där lägre effektivitet bidrar till högre driftskostnader under dess livstid. Motorförluster består till största delen av friktionförluster, luftfriktion, järnförluster och ohmiska förluster, vilka behandlas under avsnitt 3.3.5.1. Förluster i elmotorn och kraftelektroniken beräknas med hjälp av följande uttryck

$$T_{\text{max}}(\omega) = \min(100\%, 100\% \cdot \frac{1}{\omega}) \text{ [-]} \quad (11)$$

$$P_{\text{LossLimited}}(\omega, T) = 1.2\% \cdot \min[(0.5 \cdot \omega + 0.5 \cdot \omega^2), \omega^{1.3}] \\ 3.5\% \cdot \left(\frac{\max(\min(T, T_{\text{max}}(\omega), -T_{\text{max}}(\omega))}{T_{\text{max}}(\omega)} \right) \text{ [-]} \quad (12)$$

Förlusterna varierar med varvtal och vridmoment och därav är dessa de enda invariabler som krävs vid beräkningarna. Båda värdena är normerade, dvs har värdet 1 vid den nominella driftpunkten, i.e. 100%. Vridmomentet kan därför variera mellan -1 och 1 medan varvtalet kan variera mellan 0 och 3. Vridmomentet begränsas när det nominella varvtalet överstigs för att den mekaniska effekten inte ska bli för hög enligt ekvation (11). Upp till 100% kan motorn hålla ett konstant vridmoment. Mellan 100%-300% varvtal begränsas den mekaniska effekten och det maximala vridmomentet som elmotorn kan ge minskar då med inversen av varvtalet. Utväxlingen till motorn väljs så att varvtalet är 300% då bussen kör vid sin maxhastighet. Bussens maxhastighet har valts till 100 km/h och varvtalet vid den nominella driftpunkten till 150 rad/s [16]. Med hjälp av denna information fastställs utväxlingen till 7.5. $P_{\text{LossLimited}}$ som är ut-variabeln från ekvation (12) är en procentsats som sedan multipliceras med motorns maximala effekt för att fastställa de totala förlusterna.

3.3.5.1 Motorförluster

Friktionförluster uppkommer ur den kraft som krävs för att övervinna motståndet i en rotation av motorns armatur eller rotor. Generellt är friktionsförluster proportionella mot rotorhastigheten. Luftfriktion skapas av turbulens i luften som arbetar

mot rotorn, där dessa förluster är proportionell mot kvadraten på rotationshastigheten [33]. Järnförluster eller kärnförluster delas vanligen upp i hysteres- och virvelströmsförluster. Hysteres uppkommer när ett magnetiskt fält växlar i kärnan, vilket skiftar magnetiseringen av materialet. Detta leder sedan till en sammandragning samt expanderings av materialets magnetiska domänväggar. I processen fastnar väggarna i defekter i kristallstrukturen, vilket leder till att de bryter sig loss och omvandlar energi till värme. Det växlande magnetfältet leder även till cirkulerande strömloopar, i detta fallet går energi förlorad genom värmeförluster i resistansen hos kärnmaterialet, dessa förluster är proportionella mot loopens area. Detta binds även samman med ohmska förluster, där värmeförluster uppstår som en biprodukt av energiöverföring. Virvelstömsförluster minimeras genom att laminera kärnan och hysteres motverkas genom att använda högvärdigt kiselstål.

3.3.6 Klimatanläggning

Bussen värms upp eller kyls vid behov av en klimatanläggning. Denna förbrukar energi som förses av batteriet vilket gör att detta är en faktor som måste tas i beaktande när energiåtgång beräknas. Följande avsnitt baseras på de tester av elbussar som ägde rum i Köpenhamsområdet mellan januari 2014 och december 2015 och utfördes av "Trafikselskabet Movia" [34]. Vid temperaturer över 20 grader förbrukas mer energi beroende på att klimatanläggningen får utföra ett större arbete medan den ökade energiförbrukningen vid temperaturer under 0 grader troligtvis beror på att körning på vinterväglag kräver mer energi. Från testerna i Köpenhamn [34] kan ett extremfall beaktas där klimatanläggningen förbrukar ca 0.3 kWh/km. Detta är dock för bussar som är 12 meter långa så detta värde multipliceras med en faktor 1.3 för att bättre stämma överens med bussarna som trafikerar Blå express-linjen. Det nya värdet multipliceras med medelhastigheten på sträckan (35 km/h) vilket ger att klimatanläggningen på bussen förbrukar 13.65 kW.

Vid låga temperaturer värms bussen oftast upp av en dieselvärmare [16]. På grund av detta tas uppvärmning vid låga temperaturer inte i beaktande vid beräkning av energiförbrukning på batteriet.

3.3.7 Laddning

I simuleringen utförs laddningen av batteriet vid bestämda tidsintervall och med en bestämd effekt. Den valda effekten på laddningen blir in-signal till batterimodulen och är ett positivt bidrag till den summering som sker där. Förbrukningen från motorn och klimatanläggningen är det negativa bidraget.

3.3.8 Haversineformeln

Då endast longitudinell-latitudinella koordinater fanns att tillgå, krävdes ett verktyg för att översätta platskoordinaterna till en sträcka i meter. Därför tillämpas haversineformeln, som bestämmer den kortaste sträckan mellan två punkter på en sfär, givet longitud λ och latitud ϕ som indata. Formel ges av

$$\text{hav}\left(\frac{d}{r_j}\right) = \text{hav}(\Delta\phi) + \cos\phi_1 \cdot \cos\phi_2 \cdot \text{hav}(\Delta\lambda) \quad [-] \quad (13)$$

där distansen mellan punkterna representeras av d och sfärens radie av r_j . För två punkter på en sfär ges haversine av centralvinkeln mellan dem av ekvation 13. Uttrycket *hav* är haversine funktionen [35] som kan skrivas om till följande uttryck

$$\text{hav}(\theta) = \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) [-] \quad (14)$$

Resultatet blir avståndet i meter mellan koordinaterna och beskrivs efter en omskrivning som

$$d = 2r_j \cdot \arcsin(\sqrt{\text{hav}(\Delta\phi) + \cos\phi_1 \cdot \cos\phi_2 \cdot \text{hav}(\Delta\lambda)}) [m] \quad (15)$$

3.3.9 Bearbetning av mätdata

Utöver beräkningen av sträckan behöver datan bearbetas på olika sätt för att kunna behandlas av Simulink-modellen. Till följd av att datan samlas in med GPS blir mätvärdena aningen brusiga och det förekommer glapp på ställen där appen tappat GPS-signalen. Glappen som uppstår kan bero på dålig kontakt eller på grund av att bussen kör genom en tunnel.

3.3.9.1 Interpolering

Den insamlade mätdata innehöll avbrott, vilket krävde interpolation för att skapa kontinuerlig data. Interpolationsmetoden som använts är linjär interpolering. För två givna koordinater blir den linjära interpolanten den raka linjen mellan punkterna. Metoden använder sig av följande formel

$$\frac{y - y_0}{x - x_0} = \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \quad (16)$$

där $(x_0, y_0), (x_1, y_1)$ motsvarar de två punkterna som interpoleras och (x, y) motsvarar koordinaterna på den interpolerade punkten som räknas fram[36].

3.3.9.2 Kurvanpassning

Interpolation av mätdata med mycket brus ger upphov till ett kraftigt oscillerande beteende om den interpolerade funktionen skall passera genom varje uppmätt värde [37]. För att få en jämnare anpassning används styckvisa polynom, eller splines och kan därför anpassas med polynom av lägre grad. I Matlab användes verktyget *Curve fitting toolbox*, som utnyttjar olika numeriska metoder. Den metod som tillämpas för kurvanpassning kallas för *Smoothing spline*. Metoden använder en kubisk spline-funktion, ett styckvist kubiskt polynom som är kontinuerligt differentierbart två gånger. Aktuella mätdata här är bussens hastighetsprofil och körsträckans höjdprofil.

3.4 Mixed-Integer Linear Programming

Mixed-Integer linear programming (MILP) involverar både kontinuerliga och diskreta variabler och används som ett ramverk för att lösa optimeringsproblem med

linjära relationer. MILP är ett betydligt kraftfullare verktyg jämfört med grundläggande linjärprogrammering, eftersom variabler kan representeras med diskreta variabler, i.e. binära heltalsvariabler [38]. Det möjliggör modellering med ja/nej beslut. MILP standardformen beskrivs enligt:

$$\begin{aligned}
 \min \quad & C^T \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} \\
 \text{s.t.} \quad & A \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} \leq b \\
 & Aeq \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} = beq \\
 & x \geq 0, \quad \forall x \in \mathbb{R} \\
 & z \geq 0, \quad \forall z \in \mathbb{Z}
 \end{aligned} \tag{17}$$

Där C är koefficientvektorn som representerar den linjära målfunktionen, x är Lösningsvektorn till icke-negativa reella tal och z är Lösningsvektorn till icke-negativa heltal. A beskriver den linjära, ojämlika begränsningsmatrisen där b är dess begränsningsvektor och Aeq den linjära jämlika, begränsningsmatrisen där beq är dess begränsningsvektor.

3.4.1 Branch and Bound

Den vanligaste metoden att lösa MILPs är branch and bound metoden, (BB, B&B, eller BnB). Branch-and-bound används i samband med den vanliga icke-heltalslösning tillvägagångssättet och är en klassisk sökmethode för att lösa begränsningsproblem [39]. MILP problem är så kallat NP-hard, vilket innebär att det krävs betydligt mer beräkningskraft desto större problem som behandlas, eftersom problemet växer exponentiellt. Detta gör processen resurskrävande, trots att branch and bound metoden gör detta mer osannolikt.

3.5 Annuitetsmetoden

Annuitetsmetoden används till att räkna om kostnaderna för laddinfrastruktur och batteriet till årliga kostnader för att åskådliggöra en jämförelse. Denna beräknas med ekvationen

$$Y_{a,\text{index}} = \frac{Y_{\text{index}} \cdot (1 + k)^n \cdot k}{(1 + k)^n - 1} \text{ [SEK/år]} \tag{18}$$

där $Y_{a,\text{index}}$ är kostnaden per år för respektive index, det vill säga annuiteten. De olika indexen är *ladd*, *batt* och *elväg*. Invärdena till ekvationen Y_{index} är kostnaderna per kW och kWh, beroende på om det är kostnaden för laddare, elväg eller batteri som beräknas.

4 Genomförande

I följande kapitel beskrivs datainsamlingen, bussystemets modellering, samt optimeringsprocessen. Avsnittet är strukturerat som sådant att datainsamlingen beskrivs inledningsvis, följt av en målfunktion som beskriver totalsystemet. Avsnittet därefter behandlar linjära begränsningar som ställer systemkrav på målfunktionen och slutligen beskrivs en matris för modelleringen av en busslinje med MILP.

4.1 Datainsamling

För att kunna genomföra en simulering behöver det en del parametrar om busslinjen vara kända. Dessa variabler inkluderar insamlad data om bussturens tid, hastighet, position, sträcka och höjden över havet. Med hjälp av hastighetsdatan beräknas bland annat accelerationen, med höjddatan beräknas körbanans lutning, tid och sträcka skall användas för att kunna relatera var på sträckan bussen befinner sig. Mätdata för hastighetsprofilering, tidsdata och longitud-latitud positionsbestämning inhämtades med applikationen *Route Recording* av Volvo Bus Corporation. Den använder högupplöst trycksampling på 5 Hz och kräver en noggrannhet på 5 meter. Appen loggar mätningarna i .csv-format som sedan direkt kan tillämpas i Excel [40]. Figur 1 illustrerar bussen körsträcka med hållplatser, för att skapa en bättre helhetsbild över körsträckan. Emellertid ingår endast 26 hållplatser i mätdatan, eftersom bussen inte stannar på samtliga stopp.

4.2 Målfunktion för kostnadsoptimering

För kostnadsoptimering av totalsystemet är bussbatteriet och laddningsinfrastrukturen av stor vikt. Först justeras kostnaderna i tabell (2) för att ta hänsyn till investeringarnas olika livslängd enligt annuitetsmetoden (18). Detta ger investeringskostnad per år som används för att definiera målfunktionen.

Tabell 2: Ingångsvärden som krävs för beräkning av annuitetskostnaden över investeringarnas livslängd

Parameter	Värde	Enhet	Beskrivning
k	0.035	-	Kalkylränta
n	10/20	år	Investeringens livslängd, batteri/laddare
c_0	1	MSEK	Initialkostnad för byggnation laddare
c_{ladd}	6000	SEK/kW	Kostnaden för laddare per kW
c_{batt}	4000	SEK/kWh	Kostnaden för batteri per kWh

Kostnadsoptimering av systemet sker med linjärprogrammering och modelleras med en målfunktionen, som definieras enligt

$$\min \sum_i C_{\text{ladd},i} + C_{\text{batt}} \quad [\text{SEK}/\text{år}] \quad (19)$$

där kostnadssegmentet för laddarna beskrivs av

$$C_{\text{ladd},i} = 0 \cdot \lambda_1 + (c_0 + c_{\text{ladd}} \cdot x_i) \lambda_2 \quad [\text{SEK}/\text{år}] \quad (20)$$

Funktionen består av initialkostnaden c_0 samt annuitetskostnaden $c_{a,\text{ladd}}$ för laddare. Effekten på laddarna vid varje station betecknas $x_i \in \mathbb{R}_+$, där i är index för de olika hållplatserna. Kostnadssegmentet för samtliga bussars batterier på linjen beskrivs av

$$C_{\text{batt}} = c_{a,\text{batt}} \cdot N_{\text{buss}} \cdot x_{\text{batt}} \quad [\text{SEK}/\text{år}] \quad (21)$$

där $c_{a,\text{batt}}$ motsvarar annuitetskostnaden för batteriet, N_{buss} är antalet bussar på linjen och $x_{\text{batt}} \in \mathbb{R}_+$ är batterikapaciteten i kWh.

Ekvation (20) innehåller också ett ja/nej fall; antingen finns det en laddare vid en hållplats eller inte. Vilket av dessa fall som gäller bestäms av de två binära variabler λ_1 och λ_2 som reglerar vilket kostnadssegment som är aktivt, där $\lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{Z}_+$. Viktigt att notera är att enbart ett av fallen kan vara aktivt, vilket begränsar λ -värdena enligt

$$\lambda_1 + \lambda_2 = 1 \quad (22)$$

4.2.1 Linjära begränsningar

Det fodras en mängd krav beträffande drift och batterienergi för att bussystemet skall klara av att köra enligt befintliga busstidtabeller. Dessa krav översätts till linjära begränsningar, vilka säkerställer systemkraven. En central begränsning beträffar energibegränsningar för systemet, där batterienergin för varje hållplats kan beräknas ur uppehållstiden vid varje stopp och energikonsumtionen under färd. Energin som tillförs vid ett stopp, E_{ladd} , är den uppladdade energin multiplicerat med laddningstiden för ett stopp i och för varje resa n . Den tillförda energin vid stopp i beskrivs som uppehållstiden för laddare i , T_{ladd} multiplicerat med laddningseffekten x_i enligt nedan

$$E_{\text{ladd},i,n} = T_{\text{ladd},i,n} \cdot x_i \text{ [kWh]} \quad (23)$$

Den maximala laddeffekten beskrivs enligt ekvation

$$x_i - P_{\text{max}} \cdot \lambda_{2,i} \leq 0 \text{ [kW]} \quad (24)$$

där P_{max} är den maximala batterikapaciteten i kWh och λ_2 är kostnadssegmentet för den aktuella hållplatsen.

Batterienergin, $E_{\text{efter},i,n}$, för ett stopp i modelleras genom att addera den laddade energin vid aktuell energinivå, $E_{\text{ladd},i,n}$ med energin vid det tidigare stoppet, $E_{\text{efter},i-1,n}$ och sedan subtrahera energin för färdsträckan från föregående stopp, $E_{\text{kons},i,n}$. Batterienergin före laddning blir p.s.s. enligt

$$E_{\text{efter},i,n} = E_{\text{ladd},i,n} + E_{\text{efter},i-1,n} - E_{\text{kons},i,n} \text{ [kWh]} \quad (25)$$

$$E_{\text{före},i,n} = E_{\text{efter},i-1,n} - E_{\text{kons},i,n} \text{ [kWh]} \quad (26)$$

och bussens initialenergi betecknas med likheten

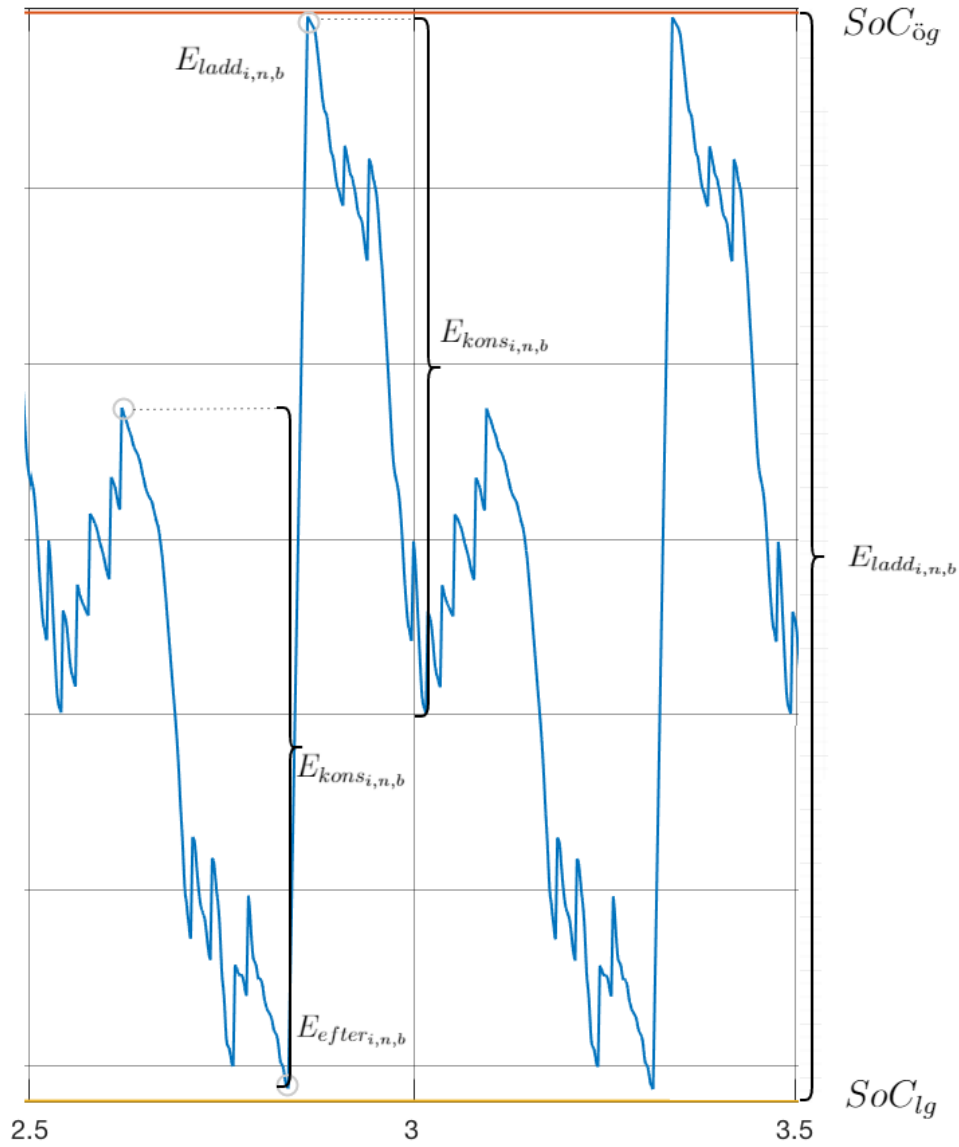
$$E_{\text{före},1} = x_{\text{init}} \text{ [kWh]} \quad (27)$$

där $x_{\text{init}} \in \mathbb{R}_+$. Batteriets energinivå måste alltid ligga mellan batteriets användningsgräns vid varje stopp. Energinivån $E_{\text{före},i,n}$ kan aldrig ligga under säkerhetsmarginalen SoC_{ug} före laddning eller över $SoC_{\text{ög}}$ efter laddning, för batteriet x_{batt} vilket visas i

$$E_{\text{före},i,n} \geq SoC_{\text{ug}} \cdot x_{\text{batt}} \text{ [kWh]} \quad (28)$$

$$E_{\text{efter},i,n} \leq SoC_{\text{ög}} \cdot x_{\text{batt}} \text{ [kWh]} \quad (29)$$

För att ge en tydligare överblick över begränsningarna illustreras energiprofilen av figur 7. Den beskriver det som nämnts tidigare; energiförlusten är energikonsumtionen när bussen färdas och energin måste ligga mellan $SoC_{\text{ög}}$ och SoC_{ug} .



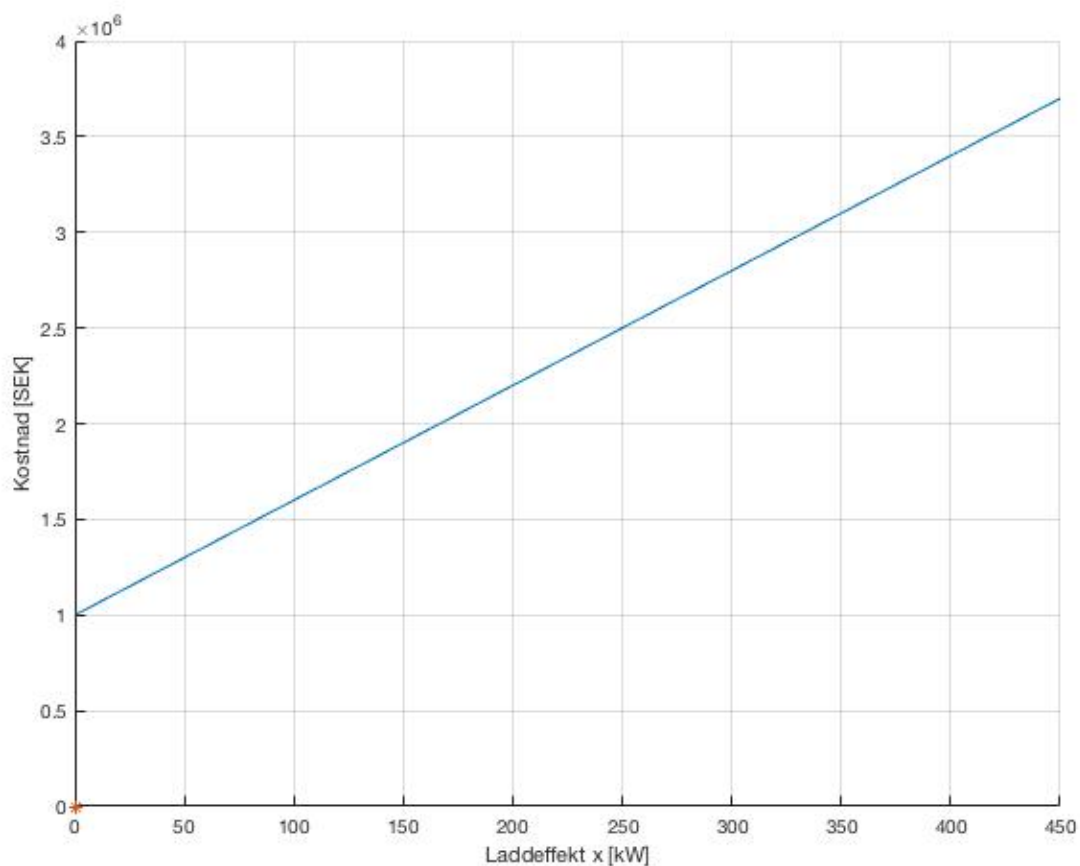
Figur 7: Energiberäkning för hållplats 3, med linjära begränsningar visualiserade

4.3 Linjär kostnadsmodell för laddare och elväg

Relationen mellan laddningskapacitet och laddarens kostnad är modellerad som en linjär kostnadsfunktion som beskrivs i figur 8. Laddinfrastrukturen har en initialkostnad och funktionen utgår från 1 MSEK i konstruktionskostnad. En ökning i laddningskapacitet medför således en högre kostnad. En fördel att modellera kostnaden som linjär är att den direkt går att tillämpa i MILP modellen, det till följd av att en målfunktion endast tar linjära begränsningar. Elvägen följer också en linjär kostnadsmodell som beskrivs enligt ekvation

$$C_{\text{elväg}} = c_{a,\text{elväg}} \cdot s_{\text{elväg}} \quad [\text{SEK}] \quad (30)$$

där $C_{\text{elväg}}$ betecknar elvägskostnaden, $c_{a,\text{elväg}}$ är annuitetskostnaden, det vill säga kostnaden per km och år och $s_{\text{elväg}}$ är elvägens sträcka i km.



Figur 8: Linjär kostnadsmodell för laddare

4.4 Modellering av en busslinje för MILP

För att formulera en busslinje enligt en matematisk modell är det viktigt att notera att MILP måste uttrycka tid i diskreta tidssteg. Ett tidssteg modelleras således som varje tillfälle som bussen stannar vid en hållplats. Busslinjens modell ställs upp som en stor matris, där matrisen består av flera olika delar som motsvara olika krav och begränsningar för optimeringen.

Första delen innehåller information om energinivåerna efter hållplatserna. Nedan demonstreras matrisens uppbyggnad med ett exempel där busslinjen har 3 hållplatser, varav 2 är ändhållplatser (hp1, hp3) och en vanlig hållplats (hp2).

Bussen besöker hållplatserna enligt följande mönster: [hp1, hp2, hp3, hp2, hp1, hp2, hp3...]. Hållplatserna besöks totalt a, b respektive c gånger under det antal hela cyklar som optimeringen omfattar.

$$A_{1,1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & SoC_{ug} & -SoC_{ög} \\ -T_{änd} & 0 & 0 & SoC_{ug} & -SoC_{ög} \\ -T_{änd} & -T_{hp} & 0 & SoC_{ug} & -SoC_{ög} \\ -T_{änd} & -T_{hp} & -T_{hp} & SoC_{ug} & -SoC_{ög} \\ -T_{änd} & -2T_{hp} & -T_{hp} & SoC_{ug} & -SoC_{ög} \\ -2T_{änd} & -2T_{hp} & -T_{hp} & SoC_{ug} & -SoC_{ög} \\ -2T_{änd} & -3T_{hp} & -T_{hp} & SoC_{ug} & -SoC_{ög} \\ -2T_{änd} & -3T_{hp} & -2T_{hp} & SoC_{ug} & -SoC_{ög} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -aT_{änd} & -bT_{hp} & -cT_{hp} & SoC_{ug} & -SoC_{ög} \end{bmatrix} \quad (31)$$

Del nummer två av matrisen motsvara energinivåerna efter varje hållplats.

$$A_{2,1} = \begin{bmatrix} T_{änd} & 0 & 0 & SoC_{ug} & -SoC_{ög} \\ T_{änd} & T_{hp} & 0 & SoC_{ug} & -SoC_{ög} \\ T_{änd} & T_{hp} & T_{hp} & SoC_{ug} & -SoC_{ög} \\ T_{änd} & 2T_{hp} & T_{hp} & SoC_{ug} & -SoC_{ög} \\ 2T_{änd} & 2T_{hp} & T_{hp} & SoC_{ug} & -SoC_{ög} \\ 2T_{änd} & 3T_{hp} & T_{hp} & SoC_{ug} & -SoC_{ög} \\ 2T_{änd} & 3T_{hp} & 2T_{hp} & SoC_{ug} & -SoC_{ög} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ aT_{änd} & bT_{hp} & cT_{hp} & SoC_{ug} & -SoC_{ög} \end{bmatrix} \quad (32)$$

Nästa del består av en enhetsmatris med en rad för varje hållplats. Varje rad har även förlängts med två kolumner för att passa ihop med ovanstående matriser enligt ett specifikt mönster som förklaras senare.

$$A_{3,1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (33)$$

Denna matrisen skall tillsammans med $A_{3,2}$ representera begränsningen till ekvation 24. I exemplet kan maximala laddareffekten $P_{\max}$ antas till 600 kW. Matrisen utformas då enligt följande:

$$A_{3,2} = \begin{bmatrix} 0 & 600 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 600 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 600 \end{bmatrix} \quad (34)$$

Nästa två delar av A beskriver λ i $A_{1,1}$ och $A_{2,1}$ enligt ekvation 22. I de linjära ekvationerna i dessa delar ingår inte λ och därför blir delarna nollmatriser. Storleken på dessa matriser beror på antalet cykler bussen kör och hur många hållplatser optimeringen omfattar. I exemplet med tre hållplatser blir dessa två delar således nollmatriser med $N_{hp} \cdot N_{cykel}$ rader och $2 \cdot N_{hp}$ kolumner. Här representerar N_{cykel} antalet cykler varje buss kör och N_{hp} representerar antalet hållplatser på linjen. Anledningen till att antalet kolumner är dubbelt så stort som antalet hållplatser finns i funktionen som skall optimeras. Här finns två binära tal, λ_1 och λ_2 , för två olika kostnadsfall. Varje hållplats har ett eget λ_1 - och λ_2 -värde.

$$A_{1,2} = A_{2,2} = 0_{3N_{cykel},6} \quad (35)$$

Nu när samtliga delar har definierats kan A sammanställas enligt följande mönster:

$$A = \begin{bmatrix} A_{1,1} & A_{1,2} \\ A_{2,1} & A_{2,2} \\ A_{3,1} & A_{3,2} \end{bmatrix} \quad (36)$$

Nästa steg i att sätta upp modellen är att definiera vektorn med variablerna som skall optimeras. För exemplet med tre hållplatser skulle vektorn utformas enligt följande:

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_{batt} \\ x_{init} \\ \lambda_{1,1} \\ \lambda_{2,1} \\ \lambda_{1,2} \\ \lambda_{2,2} \\ \lambda_{1,3} \\ \lambda_{2,3} \end{bmatrix} \quad (37)$$

Notera att indexeringen för λ_1 och λ_2 antyder vilken hållplats det handlar om; hp1, hp2 och hp3.

För att färdigställa det linjära ekvationssystemen enligt ekvation(17) behövs även en vektor b som begränsar olikheten. I det beskrivna exemplet utformas b som en vektor som har samma längd som A har rader. Likt A delas b in i olika delar:

$$b_1 = \begin{bmatrix} -E_{kons,1} \\ \sum_{i=1} -E_{kons,i} \\ \sum_{i=1,2} -E_{kons,i} \\ \sum_{i=1,2,3} -E_{kons,i} \\ \sum_{i=1,2,3,2} -E_{kons,i} \\ \vdots \\ \sum_{i=1,2,3,2,\dots} -E_{kons,i} \end{bmatrix} \quad (38)$$

I denna delen av b summeras energiförbrukningen mellan varje hållplats. Energierna är här negativa för att det är energi som förbrukas. Nästa del av b sätt ihop på liknande sätt, dock används energiförbrukningen efter hållplatserna.

$$b_2 = \begin{bmatrix} E_{kons,1} \\ \sum_{i=1} E_{kons,i} \\ \sum_{i=1,2} E_{kons,i} \\ \sum_{i=1,2,3} E_{kons,i} \\ \sum_{i=1,2,3,2} E_{kons,i} \\ \vdots \\ \sum_{i=1,2,3,2,\dots} E_{kons,i} \end{bmatrix} \quad (39)$$

Till slut fylls resterande rader i b ut för att matcha antal rader i A . I exemplet med tre hållplatser ser resterande del av b ut enligt följande:

$$b_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (40)$$

Den här delen av b består enbart av nollor för uppfylla olikheten i ekvation (24). Vektorn b sätts sedan ihop till en enda lång vektor så att

$$b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} \quad (41)$$

Nu är ekvationssystemet för olikheterna uppställt. Likheter i ekvationssystemet $Aeq \cdot x = beq$ enligt ekvation (17) innehåller begränsningen för varje λ enligt ekvation (22). Notera återigen att varje hållplats har 2 stycken λ -värden vardera.

4.5 Optimering av busslinje

För att optimera Blå Express behöver vissa variabler tas fram från mätdata och övrig information om busslinjen. Variablerna som behövs är följande:

Tabell 3: Variabler som krävs för optimeringen

Parameter	Värde	Enhet	Beskrivning
$T_{\text{änd}}$	4,6,8	min	Tiden bussen står vid ändhållplats
T_{hp}	25	s	Tiden bussen står vid övriga hållplatser
P_{max}	600	kW	Maximal laddeffekt
c_0	70361	SEK/år	Byggnationskostnaden per laddare och år
$c_{\text{a,ladd}}$	422	SEK/kW · år	Kostnaden för laddare per kW per år
$c_{\text{a,batt}}$	481	SEK/kWh · år	Kostnaden för batteri per kWh per år
$x_{\text{batt,max}}$	300	kWh	Maximal batteristorlek
$SoC_{\text{ög}}$	75	%	Övre gräns på State of Charge
SoC_{ug}	25	%	Undre gräns på State of Charge
N_{buss}	15	st	Antal bussar
N_{cykel}	14	st	Antal cyklar bussen kör
N_{hp}	26	st	Antal hållplatser längs linjen

Mätdata innehåller data för hur länge bussen stannar vid varje hållplats. Medelvärdet av tiderna används i optimeringen som T_{hp} . Den maximala effekten, P_{max} sätts utifrån vilka befintliga lösningar som finns eller är i testfas. Värdet motsvarar den maximala effekten på laddare som utvecklas idag. Vidare sätts priserna för laddare och batterier enligt kostnadsberäkningen. Dessa motsvaras av tabellvärdena c_0 , $c_{\text{a,ladd}}$ samt $c_{\text{a,batt}}$. Likt den maximala laddareffekten sätts den maximala batterikapaciteten utifrån befintliga bussar. Maximala batterikapaciteten sattes därefter till $x_{\text{batt,max}}$. Notera att ett större batteri medför en högre totalvikt, vilket i sin tur påverkar passagerarkapaciteten.

Som tidigare beskrivet behöver batteriets State-of-Charge ligga inom ett begränsat intervall för maximal livslängd. Utifrån teorin sätts även gränserna för State-of-Charge till SoC_{ug} och $SoC_{\text{ög}}$. Vidare behövs även övrig information om busslinjen vägas in i optimeringen. Här användes mätdata och tidtabeller för att uppskatta N_{buss} , N_{cykel} och N_{hp} . För att testa olika fall genomfördes optimeringen med tre olika stopptider för ändhållplatsen, dessa representeras av $T_{\text{änd}}$.

Till sist sammanfogas optimeringen till en modell av busslinjen i *Matlab* där optimeringen genomfördes genom att använda funktionen *intlinprog*. Funktionen löser MILP med olika metoder. Här valdes Branch-and-Bound som metod.

4.6 Simulering

För att fastställa bussens energiförbrukning under specifika tidpunkter under turen och för att kontrollera att en viss laddningskonstellation fungerar utförs en simulering i *Simulink*. Se illustration över modellen under bilagor. Ingående variabler är

bussens hastighet och vinkel för varje sekund under en cykel. Resultatet av simuleringen är en vektor med värden som visar hur batteriets energinivå förändras under färden. Eftersom den uppmätta körcykeln endast innefattar bussens färd på ett håll på linjen repeteras denna tillräckligt många gånger för att representera en dags körning. Simuleringen utförs med parametrar som är specifika för de olika alternativ som fastställs vara billigast enligt optimeringsberäkningarna. De variabler som används från optimeringen är vid vilka hållplatser bussen ska laddas, med vilken effekt detta sker och hur stort batteriet ska vara.

4.7 Kostnadsberäkningar

För att slutföra kostnadsberäkningen utifrån optimeringens resultat krävs det att även chaufförskostnaderna omfattas. Optimeringen ger det mest gynnsamma förhållandet mellan antalet laddare, deras effekt samt batteristorlek. Beroende på vilket scenario som optimeras, ansätts den årliga chaufförskostnaden till

$$C_{\text{chaufför}} = c_{\text{chaufför}} \cdot T_{\text{chaufför}} \cdot N_{\text{buss}} \text{ [SEK/år]} \quad (42)$$

där den tiden $T_{\text{chaufför}}$ är den tiden som behövs per cykel, den ansätts så att

$$T_{\text{chaufför}} = T_{\text{extra}} \cdot N_{\text{cykel}} \cdot 365 \text{ [s/år]} \quad (43)$$

Chaufförens timlön motsvarar $c_{\text{chaufför}}$ och T_{extra} den extra tid per cykel som busschauffören lägger utöver sin bufferttid. Den totala kostnaden inkluderar endast de parametrar som skiljer mellan de olika årskostnader; ekvivalenta kostnader tar ut varandra mellan alternativen. Den totala kostnaden blir således summan av de årliga kostnaderna enligt

$$C_{\text{tot}} = \sum_i C_{\text{ladd},i} + C_{\text{batt}} + C_{\text{chaufför}} \text{ [SEK/år]} \quad (44)$$

4.8 Känslighetsanalys

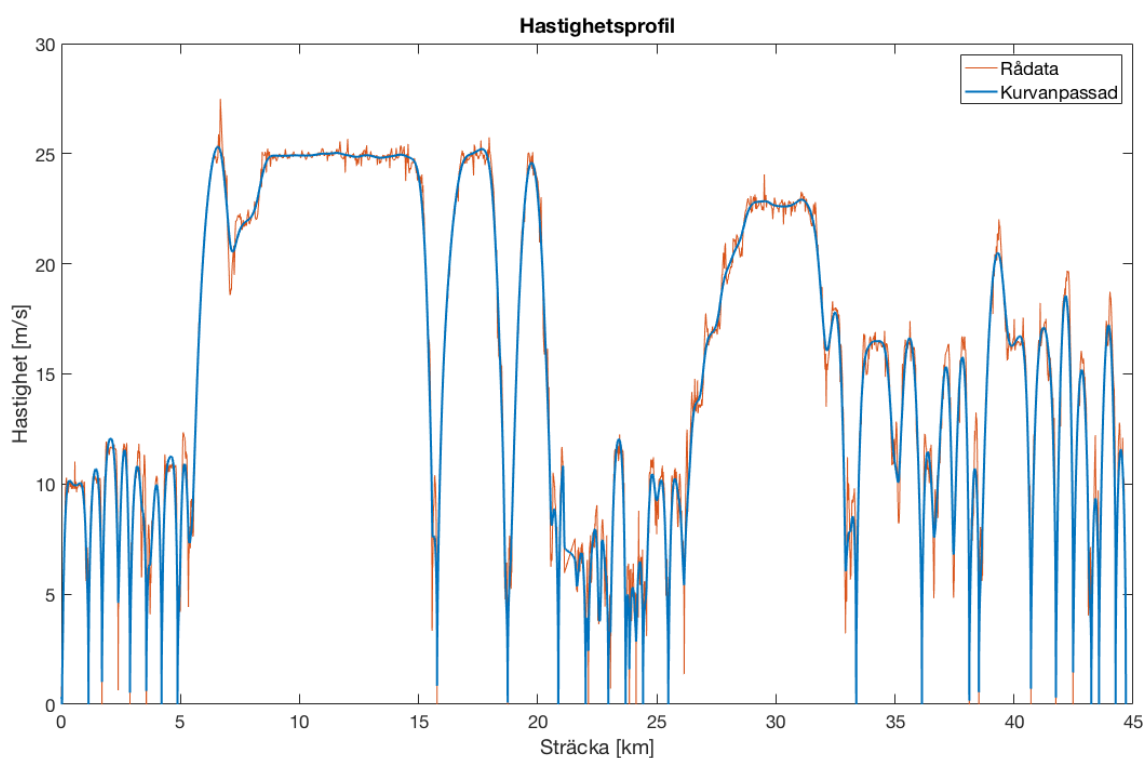
Känsligheten i modellen kan påverkas av flera olika parametrar, däribland massan på bussen, förluster i systemet, hastighet och acceleration samt friktion mot underlag. För att undersöka hur dessa variabler påverkade resultaten gjordes ändringar i ingångsvärden. Det innebar en undersökning av deras påverkan på batteriets energiförbrukning samt kostnaden för systemet. Denna analysen genomfördes genom att en variabel åt gången ändrades för att se hur den specifika parametern påverkade den ursprungliga modellen. För att få en analys med marginal så ökades dessa variabler med 25-50%. Analysen delades sedan upp i två delar, där ena omfattade den tekniska biten med hur batteriets energinivå påverkades av förändringar i ingångsvärdena och den andra omfattade hur kostnaden för systemet påverkades.

5 Resultat

I följande avsnitt presenteras resultatet från projektet. Inledningsvis beskrivs bussens körcykel och krafter som verkar på den. Detta följs av batteriets energinivå, optimeringsarbetet och en känslighetsanalys, som beskriver olika parametrars inverkan på modellen.

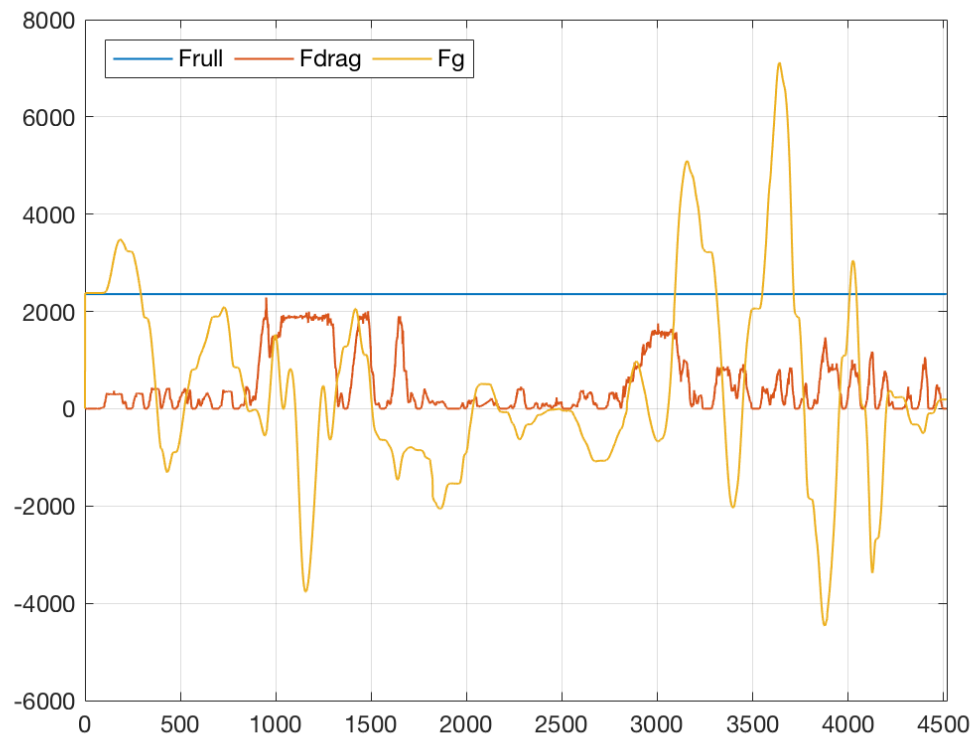
5.1 Körcykel

Bussens hastighetsprofil genomgick interpolering och kurvanpassning, vilket illustreras enligt figur 9. Rådatan motsvarar den röda kurvan, medan den blå motsvarar en kurvanpassad och interpolerad körcykel.

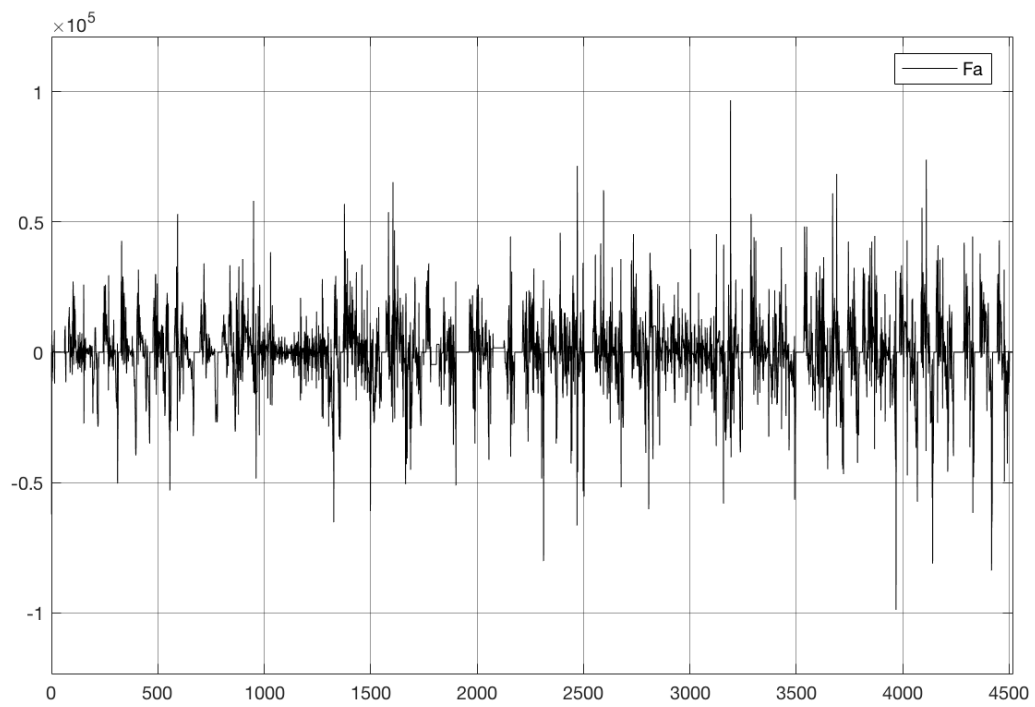


Figur 9: Hastighetsprofilen över sträckan som rådata samt kurvanpassad rådata

För att bilda en uppfattning om de olika krafternas inverkan på bussmodellen studerades deras respektive bidrag enligt figur 10. Ur denna fastställs att accelerationskraften F_a varierar betydligt mer än övriga krafter och presenteras därför enskilt i figur 11 för noggrannare undersökning.



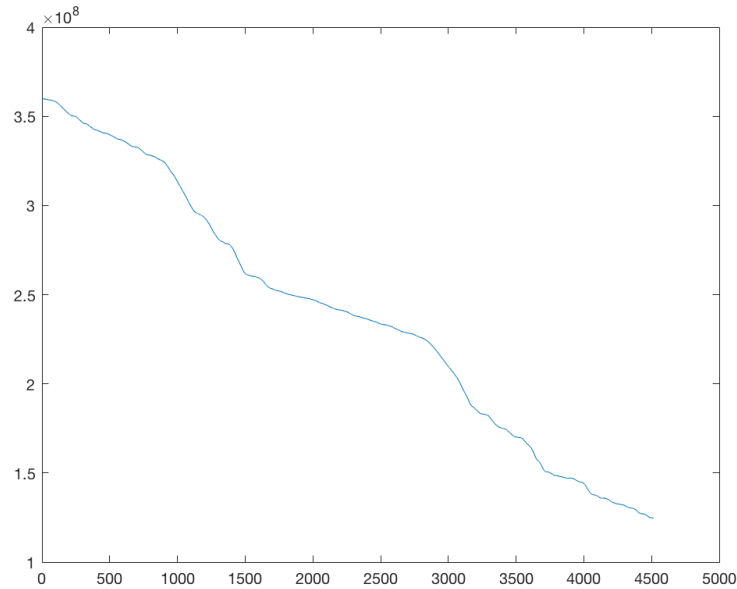
Figur 10: F_{rull} , F_g och F_{drag} som funktion av tid



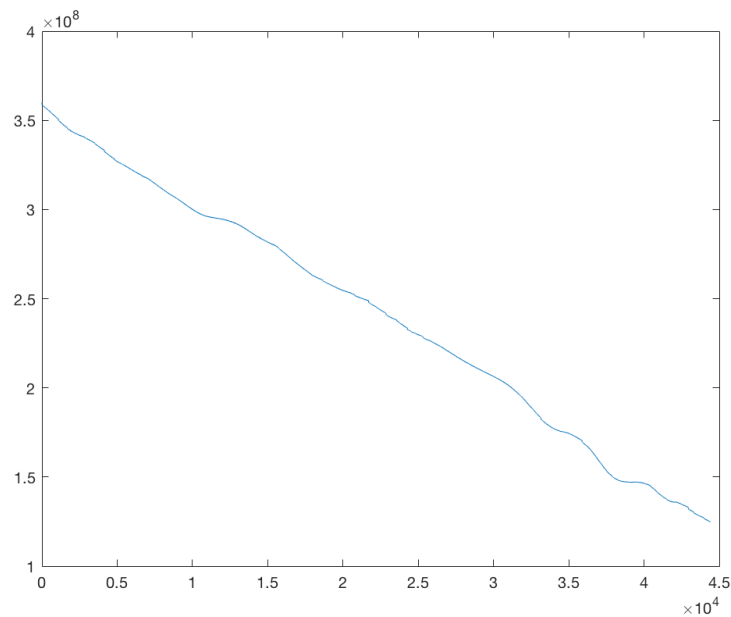
Figur 11: Accelerationskraft F_a som funktion av tid

5.2 State of charge

Den kurvanpassade hastighetsprofilen tillsammans med vinkeln från hastighetsprofilen användes som indata till *Simulink*-modellen. Som utdata erhålls laddningsnivå och State of Charge som funktion av tid respektive sträcka, vilket illustreras i figur 12 och figur 13. Batterikapaciteten vid simuleringarna som illustreras med figurerna nedan var 100 kWh.



Figur 12: State of Charge som funktion mot tid



Figur 13: State of Charge som funktion mot sträcka

5.3 Optimering och simulering

I följande avsnitt redovisas resultaten av några av de olika optimeringar och simuleringar som genomförts. Karaktäristiken på de olika *Simulink*-simuleringarna bestäms av resultatet från optimeringsberäkningarna som utfördes. Av de simuleringar som utfördes redovisas fyra stycken utvalda resultat nedan som bedöms mest intressanta. Gemensamt för alternativen med hållplatsladdare är att de alltid har minst en laddare i varje ände av busslinjen, med "antal mellanladdare" menas alltså de laddare som används exklusive ändhållplatsladdarna.

Tabell 4: Gemensamma invärden för alla optimeringar

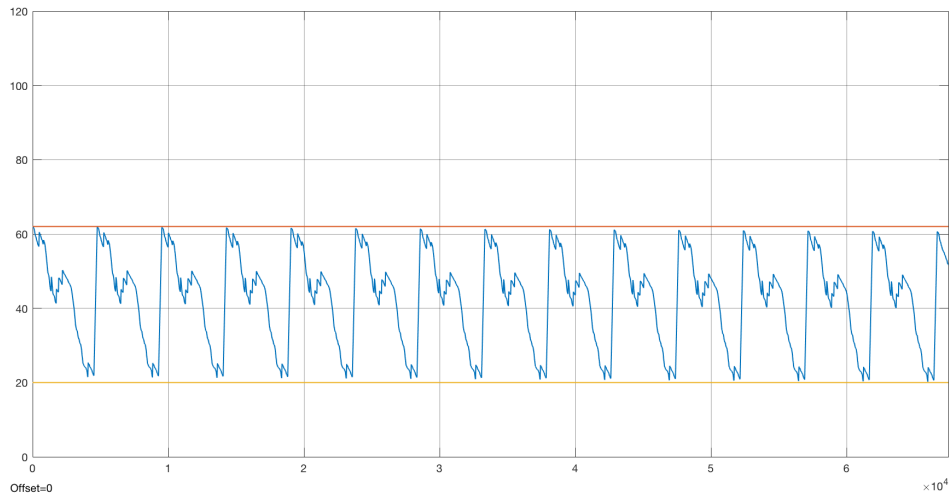
Parameter	Värde	Enhet
$P_{\max}$	600	kW
T_{hp}	25	s
c_0	70361	SEK/år
$c_{a,\text{ladd}}$	422	SEK/kW · år
$c_{a,\text{batt}}$	481	SEK/kWh · år
c_{chaff}	380	SEK/h

5.3.1 Alternativ 1 - Ändhållplatsladdning 4 min

Det första alternativet är en lösning med hållplatsladdare. Mängden tid som bussen står stilla vid ändhållplatsen minimeras och därmed sänks även merkostnaden för den outnyttjade busschauffören. Resultatet blir en lösning med relativt många laddare utmed busslinjen och redovisas i tabell 5 och figur 14. P_{ml} definieras som den effekt som används på numrerad hållplats och referensbild för körsträckan finns illustrerad i figur 1.

Tabell 5: Värden optimering

Parameter	Värde	Enhet	Beskrivning
N_{ml}	7	st	Antal mellanladdare
$P_{\text{änd}}$	600	kW	Effekt för ändhållplatsladdare
P_{ml} nr 26,22,20,19,18,6	600	kW	Effekt för mellanladdare
P_{ml} nr 23	183	kW	Effekt för mellanladdare
$T_{\text{änd}}$	4	min	Tid ändhållplatsladdning
x_{batt}	80	kWh	Storlek batteri
C_{chaff}	1.94	MSEK/år	Total chaufförskostnad per år
C_{tot}	6.85	MSEK/år	Total lösningskostnad



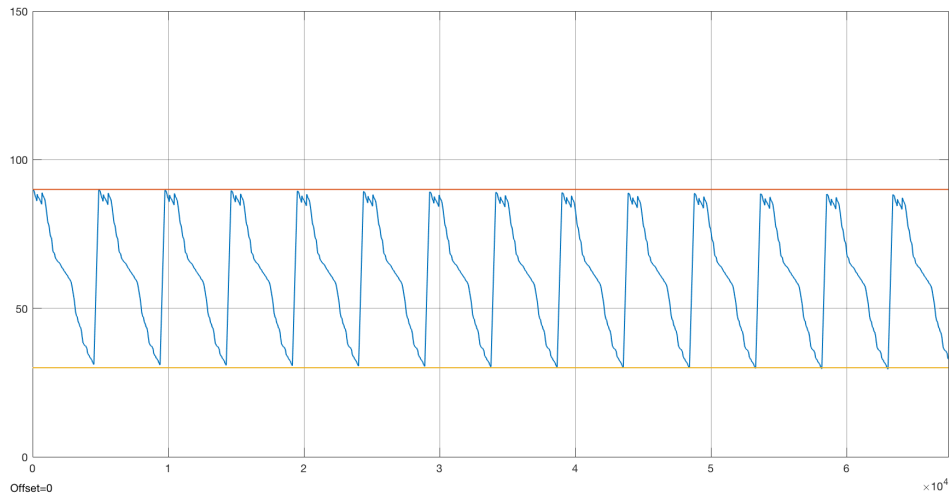
Figur 14: State of Charge för laddningsalternativ 1

5.3.2 Alternativ 2 - Ändhållplatsladdning 6 min

I alternativ 2 väljs en något längre laddtid vid ändhållplatserna vilket resulterar i en lösning med färre laddare utmed busslinjen och ett något större batteri. Detta redovisas i tabell 6 och figur 15.

Tabell 6: Värden optimering

Parameter	Värde	Enhet
N_{ml}	2	st
$P_{änd}$	600	kW
P_{ml} nr 28	368	kW
P_{ml} nr 24	600	kW
$T_{änd}$	6	min
x_{batt}	120	kWh
C_{chaff}	2.91	MSEK/år
C_{tot}	5.74	MSEK/år



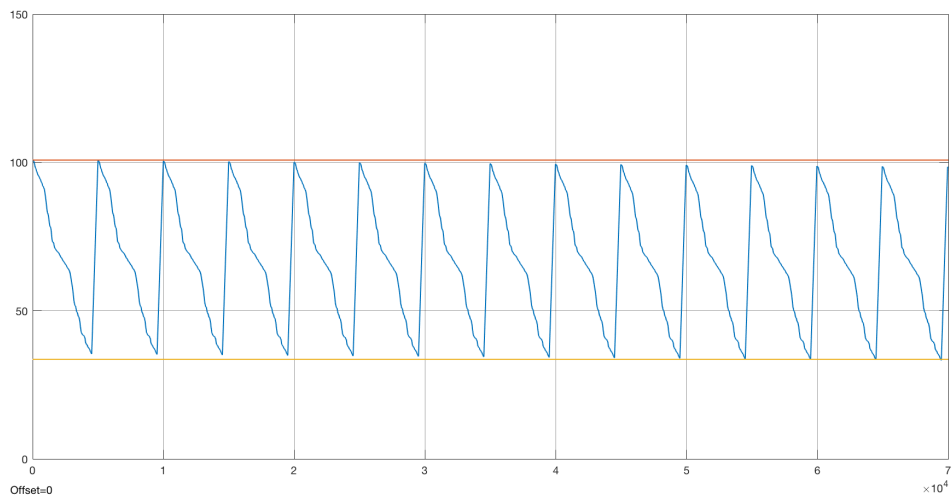
Figur 15: State of Charge för laddningsalternativ 2

5.3.3 Alternativ 3 - Ändhållplatsladdning 8 min

Alternativ 3 är en lösning utan hållplatsladdare utmed vägen, alltså endast ändhållplatsladdare. Detta är möjligt på grund av ett längre stopp vid ändhållplatserna. Detta redovisas i tabell 7 och figur 16.

Tabell 7: Värden optimering

Parameter	Värde	Enhet
N_{ml}	0	st
$P_{änd}$	504	kW
$T_{änd}$	8	min
x_{batt}	135	kWh
C_{chaff}	3.88	MSEK/år
C_{tot}	5.91	MSEK/år



Figur 16: State of Charge för laddningsalternativ 3

5.3.4 Alternativ 4 - Elväg

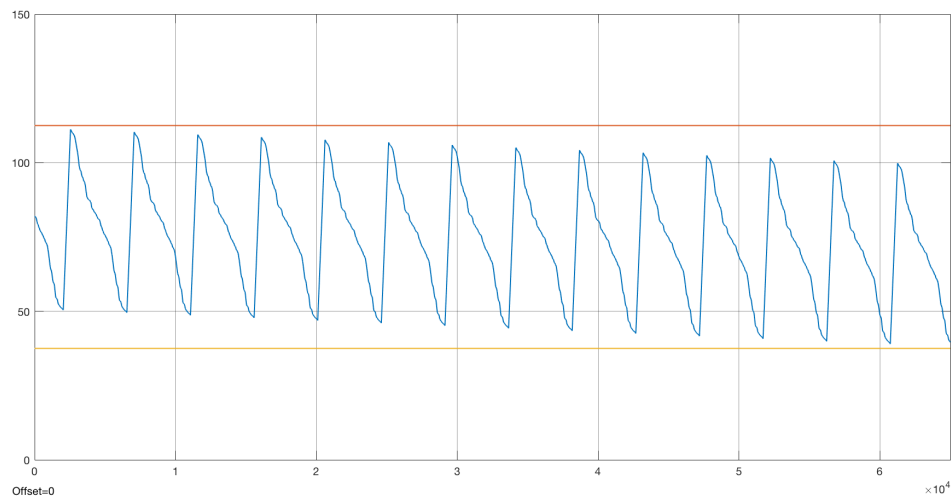
Det sista utvalda alternativet använder elvägsteknik istället för hållplatsladdare. Lösningen utgörs av en elvägssträcka placerad mellan kilometer 22 och 24.274 mätt från Kullaviks hamn som motsvara hållplats 30 i figur 1.

Tabell 8: Invärden optimering

Parameter	Värde	Enhet	Beskrivning
$P_{\max, \text{elväg}}$	450	kW	Maximal effekt för elväg
$T_{\text{elväg}}$	8.62	min	Tid bussen laddas av elväg
$S_{\text{elväg}}$	2.274	km	Sträcka elväg
$c_{\text{elväg}}$	20	MSEK/km	Total lösningskostnad

Tabell 9: Utvärden optimering

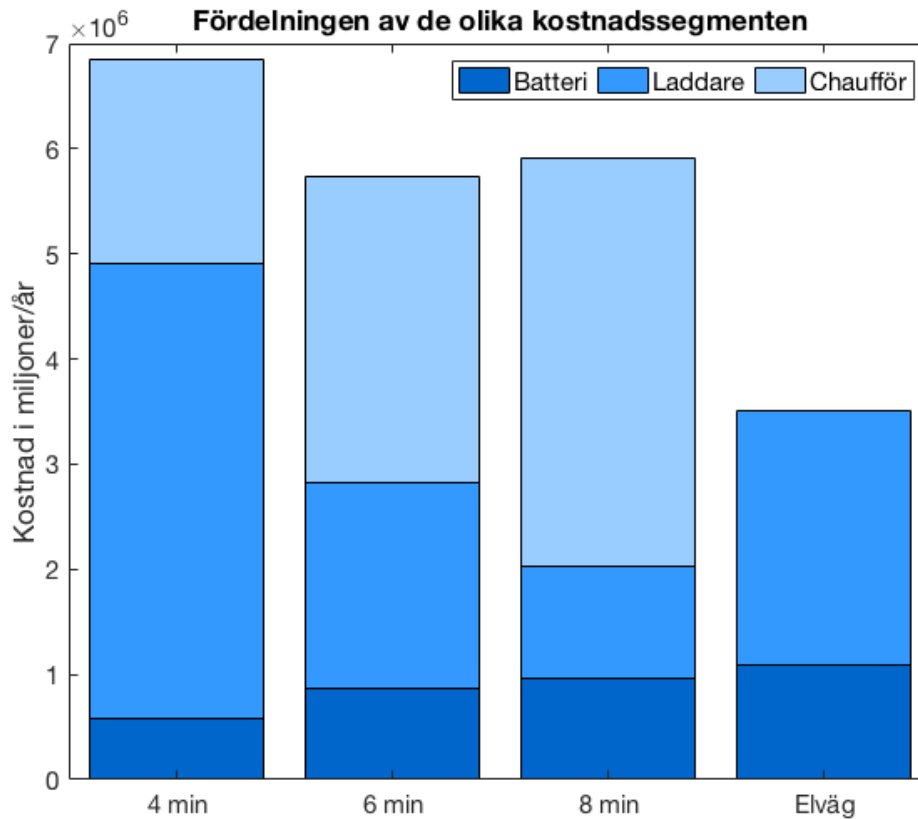
Parameter	Värde	Enhet
x_{batt}	150	kWh
C_{tot}	3.2	MSEK/år



Figur 17: State of Charge för laddningsalternativ 4

5.4 Kostnadssammanställning

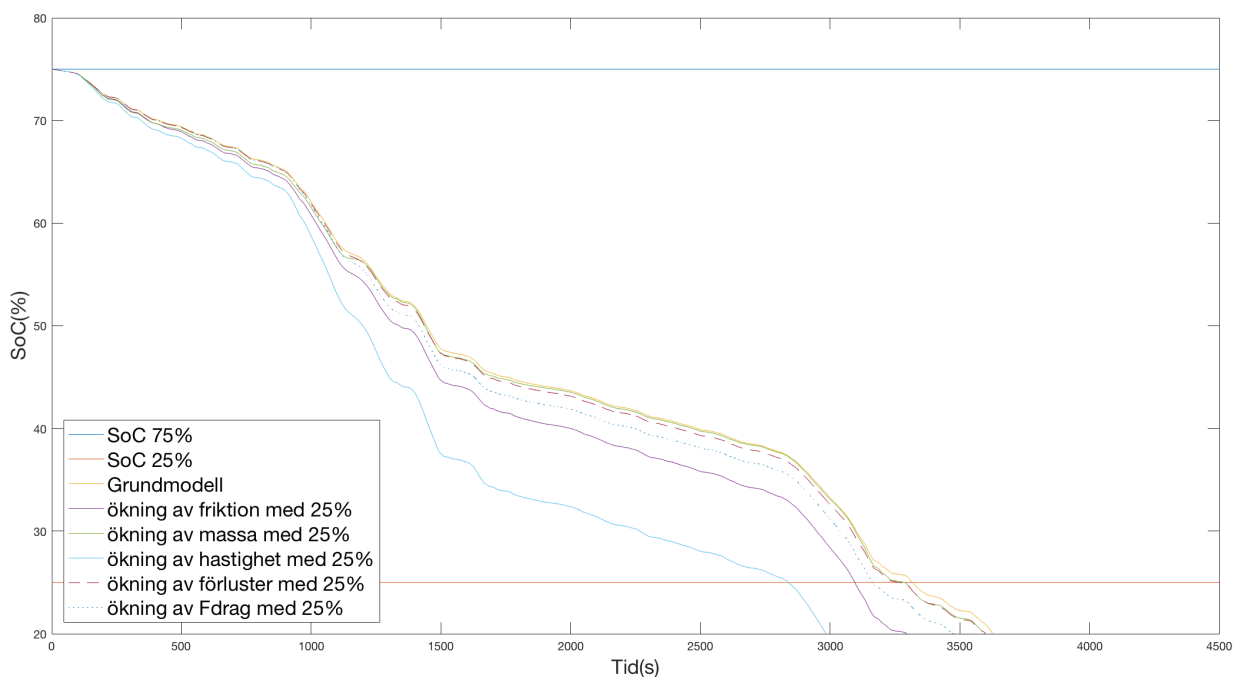
Samtliga alternativ medför olika kostnader. I grafen nedan presenteras den totala kostnaden i värsta fall. Här representerar den ljusare stapeln kostnaden för chauffören om bussen kommer sent varje gång och inte kan ladda under bufferttiden.



Figur 18: Sammanställda kostnader för de olika alternativen

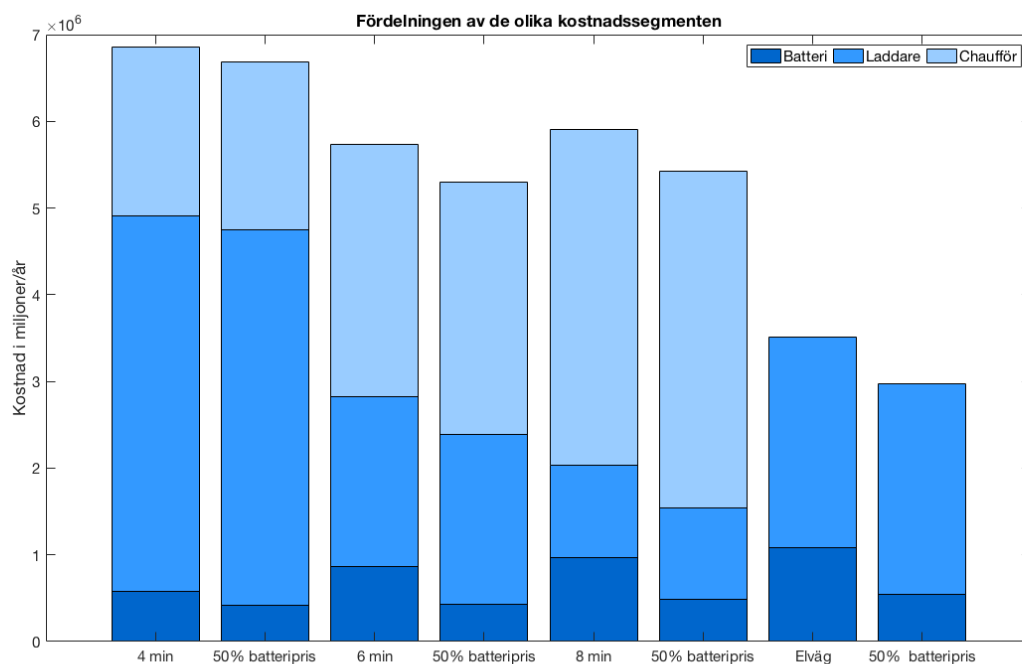
5.5 Känslighetsanalys

De parametrar som ändrades i den första delen av analysen var friktionen, massan, hastigheten, luftmotståndet och förlusterna. Resultatet av hur batteriets energiförbrukning påverkas finns att se i figur 19. Här illustreras att en ökad hastighet bidrar mest till högre förbrukning, samt även att friktionen har en stor inverkan. Ökning av massa, luftmotstånd samt förluster gav endast en marginellt högre förbrukning.



Figur 19: Känslighetsanalys av olika variabler. Större version finns i Bilaga C

För att testa kostnadsberäkningarnas känslighet utförs en ny sammanställning, denna gång inklusive fyra nya lösningsalternativ där kostnaden för batterierna har halverats. Detta anses vara ett relevant scenario då priserna på batterier förväntas minska de kommande åren[11]. Resultatet redovisas i figur 20.



Figur 20: Kostnadssammanställning med känslighet för halverat batteripris

6 Diskussion

I detta kapitel diskuteras inledningsvis resultatet och dess innebörd för projektet, samt hur de olika delarna kan ha påverkats av felfaktorer. Vidare tas de existerande laddteknikerna upp och även hur miljön påverkas vid en realisering av projektet. Kapitlet avslutas med en diskussion om elbussars framtid.

6.1 Körcykel

Körcykeln som uppmättes gjordes mitt på dagen, alltså inte under rusningstrafik. Endast en mätning gjordes baserat på bedömningen att fler mätningar inte skulle ge ett bättre modellerat system. Fler mätningar hade säkerligen gett mer tillförlitliga och robusta mätresultat för just Blå Express men det hade inte nödvändigtvis gett bättre slutgiltiga slutsatser. På grund av denna osäkerhet gjordes med andra ord bedömningen att lägga tid på andra delar i projektet än att utföra flera mätningar. En känslighetsanalys gjordes där flera variabler ändrades för att ta hänsyn till flera olika scenarion.

6.2 Kraftjämvikt

Friktionskraften F_{rull} ger ett konstant relativt stort bidrag jämfört med övriga krafter som verkar på bussen. Detta innebär att det finns stor nytta av att se över faktorer som påverkar friktionskraften, exempelvis däcktryck och däckmönster.

Luftmotståndet F_{drag} påverkar främst energiförbrukningen vid höga hastigheter vilket illustreras i figur 10. Detta kan även ses i ekvation (2) där hastigheten är kvadrerad vilket innebär att en ökning av hastigheten påverkar luftmotståndet kvadratisk. Eftersom den undersökta busslinjen är en så kallad expressbuss som kör vissa sträckor på motorväg, är hastigheten ofta hög och då blir luftmotståndet också högt.

Gravitationskraften F_g , som beror på topografin, visar emellanåt relativt stora värden under körcykeln, men eftersom bussen åker samma sträcka fram och tillbaka kommer merparten av bussens energiförbrukning i uppförsbacke regenereras i nerförsbacke vilket leder till att det totala bidraget från gravitationskraften kommer bli relativt litet jämfört med övriga krafter.

Accelerationskraften F_a varierar mest av krafterna men även här gäller att mycket av energin regenereras vid retardation, se figur 11. Accelerationskraften är också den kraft som påverkas mest av förändrat trafikläge, eftersom ökad trafik innebär fler start och stopp under körningen. Är inbromsningen för kraftig kommer inte batteriet kunna ta upp lika mycket av den regenerativa energin [29]. Hastigheten överlag kan antas bli något lägre under hög trafik vilket innebär lägre energiförbrukning.

Förbrukning från ventilation, luftkonditionering och uppvärmning har valts till ett konstant högt värde vilket ger en större förbrukning än i verkligheten. Uppvärmning under kalla dagar sker idag via bränsle och det är osannolikt att de systemen

dimensioneras om för att klara de högsta förbrukningarna.

6.3 State of Charge

Den genomsnittliga energiförbrukningen från modellen på 1.44 kWh/km stämmer förhållandevis väl överens med det generella värdet på 1.5 kWh/km [16] och uppmätta värden i Köpenhamn på cirka 1.35 kWh/km [34]. Gravitationskraften är för det mesta låg då lutningen på vägen är liten medan friktionskraften ligger konstant på en förhållandevis hög nivå och därmed har stor inverkan, vilket ger SoC-kurvan en mer konstant lutning, se figur 10. I figur 12 syns tydligt att SoC-kurvan får brantare lutning tidigt i mätningen, vilket sammanfaller med en motorvägssträcka där hastigheten är runt 90 km/h och energiförbrukningen är hög. Figur 13 har en mer konstant förbrukning vilket beror på att x-axeln i detta fall är distans. Ökad hastighet ger inte någon brantare lutning på grafen eftersom tillryggalagd sträcka också ökar proportionellt med hastigheten. De små variationerna kan förmodligen vara ökad förbrukning på grund av topografin.

6.4 Optimering och simulering

Kostnadsoptimering utfördes i *Matlab* och manuellt för att få fram den billigaste laddningskonstellationen. I fallet där bussen laddas med elväg genomfördes en kostnadskalkyl för hand då enbart ett ungefärligt värde eftersträvades. Denna baserades på bussen medelhastighet. Där medelhastigheten var som lägst antogs elvägen vara som effektivast då tiden bussen kan laddas var som högst. Notera att elvägen hamnar nästan precis på mitten av körsträckan vilket innebär att energiförbrukningen från och till elvägen är liknande, åt båda hållen. Optimeringen utfördes för ett antal förutbestämda uppsättningar av parametrar. Fyra alternativ valdes ut för jämförelse, tre med hållplatsladdning och ett med elvägsladdning. Samtliga alternativ simulerades i *Simulink* för att fastställa att konstellationen möjliggjorde en hel dags körning av bussen. Resultatet av simuleringarna visade att samtliga alternativ kunde utföra en dags körning av bussen och den grundläggande förutsättningen att batteriets energinivå hålls inom bestämda gränser under körning var uppfylld.

6.5 Kostnadssammanställning

Resultatet av kostnadssammanställningen i figur 20 uppvisar summerade kostnader per år för batteri, laddare, elväg samt chaufförskostnaden för tid utöver bufferttiden. Elväg påverkas inte av kostnaden för chaufför eftersom bussen laddas under färd. Resultatet visar att en längre ändhållplatsladdning minskar kostnaderna för laddare eftersom färre laddare krävs på sträckan. Med lång ändhållplatsladdning ökar batteristorleken och därmed batterikostnaden. Detta innebär samtidigt att chaufförskostnaden ökar eftersom tiden som bussen står stilla ökar.

I kostnaden för alternativen med 4 min och 6 min ändhållplatsladdning utgörs en stor del av den totala kostnaden av laddarna. Till skillnad från alternativet med 8 min ändhållplatsladdning har dessa två alternativen laddare som är utplacerade

längs vägen. Dessa laddare kostar dubbelt så mycket för att ta hänsyn till bägge körriktningarna då hållplatserna antas ligga på vardera sida om vägen. Skulle mellanladdarna istället kunna ha gemensam hållplats och laddare skulle priset för laddarna minska något i alternativ 1 och 2.

För att analysera vilket av kostnadsalternativen som är mest gynnsamt gäller det även att tänka på att kostnaden för laddare, batterier och elväg är optimerade så att de precis täcker bussens beräknade energiförbrukning för en cykel. Dessa kostnader kan därför behöva höjas om en större säkerhetsfaktor eller överdimensionering appliceras. Även chaufförskostnaden kan komma att förändras då antagandet att bussen alltid är sen inte bör gälla för samtliga turer bussen kör. Att bufferttiden för förseningar aldrig kan utnyttjas för laddning är i själva verket ett extremt scenario och därför kan chaufförs-delen av kostnaderna anses vara ett maximalt värde.

Enligt sammanställningen är elväg det ekonomiskt bästa alternativet förutsatt att det ovan nämnda antagandena stämmer. Ändhållplatsladdning blir dock intressant om bussen är i tid majoriteten av körcyklarna. Hur priserna kommer att utvecklas i framtiden är också en viktig punkt att tänka på. Alltefter teknikerna utvecklas kan en sänkning av framför allt batteriekostnaden vara mycket trolig. Tekniken med laddstationer för att ladda batterier finns tillgänglig för kommersiellt bruk idag. Elvägen däremot är i dagsläget enbart i försöksstadiet vilket gör en uppskattning av en eventuell prisförändring svår. Hur tekniken utvecklas kommer att påverka den slutgiltiga kostnaden av systemet. Fördelen med elväg för busslinjer med batteriedrivna fordon är att kostnaden för chauffören hålls låga. Sammanställningen visar att just förarkostnaden gör alternativ med laddstationer till ett kostsammare alternativ jämfört med elväg. Skulle det gå att eliminera denna genom antingen kraftigare laddare eller kommersiellt tillgänglig elväg skulle systemet bli betydligt gynnsammare, ekonomiskt sett.

6.6 Laddteknik och lagring av energi

Flera olika tekniker för att ladda bussen togs upp i teoriavsnittet. Nedan följer en kort diskussion kring de olika teknikerna och batteriets egenskaper.

6.6.1 Batteri

Det finns många olika batterikemier men gemensamt för alla är att de försämras beroende på hur många cykler de kört. I modellen har det antagits att State of Charge hålls inom vissa gränser då detta förlänger batteriets livslängd, men efter ett stort antal cykler kommer batteriets kapacitet försämras. För att skapa en säkerhetsmarginal behöver därför batteriet dimensioneras för detta, om batteritypen är av ett slag som uppvisar kraftig försämring beroende på cykelantal. Detta innebär i så fall att kostnaden för batteri ökar något.

6.6.2 Konduktiv laddning

Konduktiv laddning för laddstationer är redan idag en etablerad teknik, dock är konduktiv elöverföring under färd ännu inte en fullt utvecklad kommersiell teknik, vilket medför att kostnaderna för denna typ av laddning också har stora osäkerheter. Osäkerheterna bygger utöver att tekniken inte är kommersiell även på att siffrorna i denna rapport bygger på uppgifter från företag, som gärna framhåller fördelarna med sin egen teknik. Trots dessa osäkerheter har denna teknik valts som en möjlig användbar teknik för elektrifiering av Blå Express. I modellen finns inte utrymme för större systemfel om endast elväg används eftersom bussarna då inte kan laddas. Exempel på systemfel kan vara strömavbrott, kontaktfel eller nedriven ledning. Viss kunskap för att undvika eller hantera liknande fel finns exempelvis från spårvägen som använder likartad teknik.

6.6.3 Induktiv laddning

Induktiva laddningsmetoder är fortfarande i försöksstadiet och tekniken är mycket dyr [21]. I en studie som beskrivs i teoriavsnittet presenteras en kostnad om 63 MSEK/km. Det bedöms därför att alternativet med induktiv laddning i dagsläget är för dyrt för att konkurrera med exempelvis elväg som är den mest jämförbara tekniken i dagsläget. Dock är det enkelt att komma på flera fördelar med induktiv laddning såsom att inga ingrepp i natur eller stadsmiljö behöver göras. Det finns idag system i drift med hög verkningsgrad. Dock kvarstår fortfarande flera frågetecken kring exempelvis påverkan från elektromagnetiska fält på människor och djur.

6.6.4 Batteribytesstation

Batteribytesstationer kan vid en första anblick låta attraktivt. Metoden förkastats dock i detta projekt eftersom den har många komplikationer. Första komplikationen rör själva hanteringen av batteribytet, eftersom batterier på bussar kan väga runt 1 ton. Därför kräver tunga batterier en lyftanordning för förflyttning av batteriet som kan ställa undan det på lämpligt ställe och sedan lyfta in ett fulladdat batteri i bussen. Den kritiska komponenten i processen är tiden [23], eftersom det är batteribytesmetodens enda egentliga fördel. Tar det längre tid att byta ett batteri än att ladda faller teknikens fördel bort. Mycket tyder på att detta också är fallet på grund av att effekten på laddningsstationer ständigt ökar. Ett annat problem med tekniken är förvaring och kapitalbindning. Eftersom bussbatterier är dyra och urladdade batterier behöver laddas krävs en facilitet som har kapacitet att ladda batterier samt säkerställa att inga obehöriga har tillgång till batterierna. En stor kapitalbindningen uppstår eftersom det krävs fler batterier än vad det finns bussar, vilket innebär att det finns potentiell kapacitet som inte utnyttjas. Detta resulterar i slutänden till en stor kapitalbindning.

6.7 Känslighetsanalys

Känslighetsanalysen utgick från att variera flera olika värden. De värden som varierades var: friktionen, massan, hastigheten, luftmotståndet samt de olika förlusterna. Ursprungsvärdena som har använts var redan från början konservativa, detta för att få fram en modell som i sig hade en inbyggd säkerhetsmarginal. Detta gäller framförallt i kraftjämvikten.

6.7.1 Modellparametrar

I analysen framkom det att en ökning av hastigheten i känslighetsanalysen är den faktor som har störst påverkan på energiförbrukningen. Detta eftersom hastigheten är kvadrerad i uttrycket för luftmotståndet (2). En ökning av hastigheten med 25% kan således jämföras med en ökning på 56% för hela luftmotståndsfaktorn. Förändrad luftmotståndskoefficient eller luftdensitet har därmed klart mindre inverkan än förändrad friktionskoefficient. Ökad hastighet är dock orimligt ur synpunkten att de uppmätta värdena följer vägens hastighetsbegränsningar. Att öka accelerationen och därmed accelerationskraften (4) nämnvärt är inte rimligt då det skulle vara oönskvärdt för passagerarna [16].

Något som inte är lika lätt att bortse från är friktionen, som kan påverkas av många faktorer såsom de som nämnts i avsnitt 6.2 samt rådande väderlek. Därför är 25% en rimlig sats eftersom extremvärden kan uppkomma. Det här gäller även för ökningen av F_{drag} som kan variera med temperatur och bidra till extremvärden. Värt att nämna är även att en ökade värden på alla parametrar över lång tidsperiod skulle få batteriet att åldras snabbare eftersom dess skulle hamna utanför de önskvärda nivåerna. På så sätt innebär ökade värden på parametrarna att bussen egentligen behöver ett större batteri.

6.7.2 Kostnadsparametrar

Resultaten är mycket känsliga för förändrade kostnader. Kostnad för chaufför och elväg är de faktorer som dominerar totalkostnaden och framförallt kostnaden för elväg är mycket osäker. Chaufförskostnaden i figur (20) innebär att chauffören aldrig kan utnyttja bufferttiden för laddning, men i en sådan situation hade inte tidtabellen hållits. I en situation där den totala kostnaden för chaufförernas extratid minskas genom laddning under bufferttiden blir alternativen med andhållplatsladdning avsevärt mer attraktiva och närmar sig kostnaden för elväg.

I synnerhet kostnad för batteri kan antas minska framöver, men förändringar i kostnad för batteri eller laddstolpar påverkar inte resultatet lika mycket eftersom villkoren för energiförbrukningen mellan varje hållplats begränsar förändringar i de variablerna. Ett något större batteri med marginal för försämrad kapacitet efter många cykler skulle i modellen också motsvara högre batterikostnad. En klar förbättring kostnadsmässigt hade varit om laddarna kunde delas med andra busslinjer,

vilket hade ökat effektiviteten för laddaren och sänkt kostnaden för Blå Express. Detta skulle vara praktiskt möjligt om laddarna hade outnyttjad kapacitet till förfogande.

6.8 Miljö

Litiumjonbatteri är idag det vanligaste batteri som används i både fordon och i mobiltelefoner mycket tack vare dess goda egenskaper. I flera olika studier [6] har det framkommit att det finns möjliga nackdelar med elektrisk framdrivning, framförallt i samband med brytningsprocessen av olika ämnen. Framförallt gruvdriften är väldigt energikrävande, i synnerhet för litium [41]. Detta är av oerhört stor vikt när utvärderingen av en buss totala miljöpåverkan framställs. En annan aspekt som är värd att ta i beaktande är att litium är en ändlig resurs även om det idag inte råder någon direkt brist på litium. Även brytningen av metallen innebär stora ingrepp i naturen vilket bör tas hänsyn till när brytning påbörjas. Eftersom batteridrivna fordon förväntas öka de kommande åren kommer det krävas utveckling av återvinningstekniker för att göra en storskalig användning av batteridrivna fordon hållbar [6]. Idag är ett av problemen med återvinning av litium att priset på återvunnen material är ca 5 gånger högre än priset för det brutna råmaterialet [42]. Detta är en av anledningarna till att återvinningen av litium inte görs i stor skala.

Elektriska bussar är under drift tysta, miljövänliga och energieffektiva. En dieselbuss drar i snitt 4.2 kWh/km [43]. Denna siffra är beräknad på innerstadstrafik och man kan därför tänka sig att den är något lägre för Blå Express eftersom bussen kör längre sträckor och inte accelererar från stillastående läge lika ofta. Om bussen istället elektrifieras drar den i snitt 1.44 kWh/km. En viktig faktor här är att valet av elkälla vid drift av elbussar är avgörande för dess miljöpåverkan. Vid val av helt förnybar el så är CO_2 -utsläppen mycket låga, men Norden har en gemensam elmarknad och den genomsnittliga produktionen i den nordiska elmixen har en stor andel fossila källor som ger utsläpp på 150 g CO_2 /km. Detta är dock långt under dieselutsläppen som ligger på 1329 g CO_2 /km [43], vilket gör att eldrift ur koldioxidutsläppssynvinkel har klara fördelar.

En ytterligare fördel miljömässigt vid elektrifiering av kollektivtrafik är att bullernivåerna minskar markant. Som tidigare nämnts så är trafiken den största anledningen till buller i innerstaden, något som bussarna bidrar mycket till. Dessa nivåer överskrider i många fall rekommendationerna från Göteborgs Stad och det finns många fördelar med att sänka dem. Bland annat så kostar buller väldigt mycket för samhället. Enligt Göteborgs Stad utsätts dagligen 100 000 göteborgare för mer än 55 dB, vilket är riktvärdet för maximal bullernivå vid bostaden från kommunen. Dessutom utsätts cirka 10 000 göteborgare för mer än 65 dB vid sin bostad [13]. Enligt Trafikverket kostar problemet med buller 23 268 SEK per person vid 65 dB, eftersom trafikverket vid dessa bullernivåer måste åtgärda problemet med exempelvis bullerskydd [44]. I denna summa räknas inte kostnader för hälsorisker in, såsom sömnproblem och olika hjärt-och kärlsjukdomar som kan uppkomma. Tillåtna värden för en buss är 77 dB enligt Svensk Kollektivtrafik [45] vilket skulle sänkas vid

elektrifiering av busslinjerna. Vid införandet av ElectriCity i Göteborg har man kunnat uppmäta nästan 7 dB skillnad vid acceleration från start, samt att elbussarna är nästan helt ljudlösa vid konstant hastighet [46].

6.9 Elbussars framtid

Vad framtiden har att utvisa är svårt att bedöma och rådande trenders påverkan är ofta otydliga att förutsäga. Det går dock att med relativt stor säkerhet säga att kostnaden för batterier kommer att sjunka[11]. Med ett bibehållet intresse för miljöfrågor bland beslutsfattare lär fler och fler bussträckor elektrifieras runt om i världen vilket i sin tur leder till att laddningstekniken fortsätter att utvecklas, blir bättre och också sjunker i pris. I en stad med flera busslinjer som är elektrifierade kan laddningsstolparna delas på flera busslinjer vilket minskar kostnaden per buss. Elvägar är idag i ett tidigt stadie och det är svårt att få tillförlitliga resultat eftersom kostnaden är osäker. Dock kommer priset med stor sannolikhet att sjunka markant om tekniken får ett större genomslag och efterfrågan blir stor.

6.9.1 Självkörande bussar och dess påverkan på priset

En väsentlig del av den totalkostnad för busslinjen som beräknas över ett större tidsspektrum består av lönekostnaden för busschauffören. Denna kostnad blir än mer kritisk när bussen inte används till att transportera människor, såsom när den elektrifierade bussen laddas. Då förarlösa bilar gör stora framsteg och även bussar närmar sig marknaden [47] finns det anledning att tro att en del av busslinjerna i svenska städer kan vara självkörande i slutet av investeringarnas livslängd. Delen av lönekostnaderna för chaufförer som uppstår när bussen laddas kan vara betydande om det inte kan göras enligt den rådande tidtabellen och bör minimeras. Blir bussarna förarlösa minskar kostnaderna avsevärt även om kostnaden för tekniken i bussen kan väntas öka.

7 Slutsats

En fortsatt utveckling av laddningsstationer och elväg förefaller som ett attraktivt alternativ för kollektivtrafiken, för att minska utsläpp från fordonsflottan. Ett system bestående av två ändhållplatsladdare med hög effekt är det klart billigare alternativet om extrakostnaderna för chaufförer exkluderas, jämfört med en elväg. Däremot blir elvägen en mer tilltalande lösning när förarkostnader tillkommer i kostnadsberäkningarna, eftersom detta är en kraftigt bidragande faktor till systemets totala slutkostnad. I detta scenario är chaufförskostnaderna dock väl tilltagna vilket gör att det kan finnas ett utfall där ändhållplatsladdningen är billigare beroende på hur mycket förseningar som förutsätts i beräkningarna. Värt att nämna är att elvägens pris/km har stor inverkan på resultatet. Detta eftersom kostnaderna varierar mycket eftersom tekniken fortfarande är i ett tidigt utvecklingsstadium. En annan intressant aspekt är de olika systemens robusthet, säkerhetsmarginaler och flexibilitet. Modellen för elväg är i nuläget inte särskilt robust eller flexibel eftersom den vid ett eventuellt systemfel blir obrukbar, exempel på detta är att luftledningarna är betydligt svårare att ersätta än hållplatsladdare. Fel i elvägssystemet kan således i värsta fall resultera i att kollektivtrafiken blir stillastående. Hållplatsladdningen däremot kan utformas så att systemet blir mer robust och flexibelt. Förutsatt att systemet har minst en mellanladdare nära mitten av busslinjen skulle systemet alltså kunna hålla för systemfel såsom trasiga hållplatsladdare, eftersom batteriet alltid kan utnyttja den undre säkerhetsgränsen på 25% av dess totala batterikapacitet om bussen skulle missa en hållplats. Detta bygger på att det enbart är en hållplats som missas eller är trasig. En stor säkerhetsfaktor bidrar således till ett robustare system och det är värt att kosta på en extra säkerhetsmarginal med några procent eftersom batteriet utgör en relativt liten kostnad för totalsystemet.

8 Förslag på fortsatt arbete

Modellens korrekthet och exakthet kan valideras ytterligare. Detta kan exempelvis göras genom att använda kördata från busslinje 55 i Göteborg och implementera denna i Simulinkmodellen och sedan jämföra med buss 55 verkliga förbrukning.

För att få högre tillförlitlighet på indata bör fler körningar göras i både låg trafik och rusningstrafik för att på så sätt säkerställa att energiförbrukningen motsvarar verkligheten någorlunda. Flera mätningar skulle även bidra med extremvärden till känslighetsanalysen vilket i sin tur skulle bidra med en mer robust och tillförlitlig känslighetsanalys.

Kostnadsfunktionen är även viktig att se över, detta eftersom kostnaden för berörd teknik ständigt ändras. Med tiden kommer kostnadsfunktionen bli mer tillförlitlig eftersom det då finns fler källor att förlita sig på såsom kostnadsuppgifter från företag och flera vetenskapliga studier. En annan viktig faktor i kostnadsfunktionen är att fortsatt undersöka de olika teknikernas avskrivningstid och dess påverkan på slutpriset.

Modellen bör göras om så att den kan hantera att laddstolpar eller elvägar kan delas av flera busslinjer. Detta skulle innebära lägre kostnader men också en ökad komplexitet.

Referenser

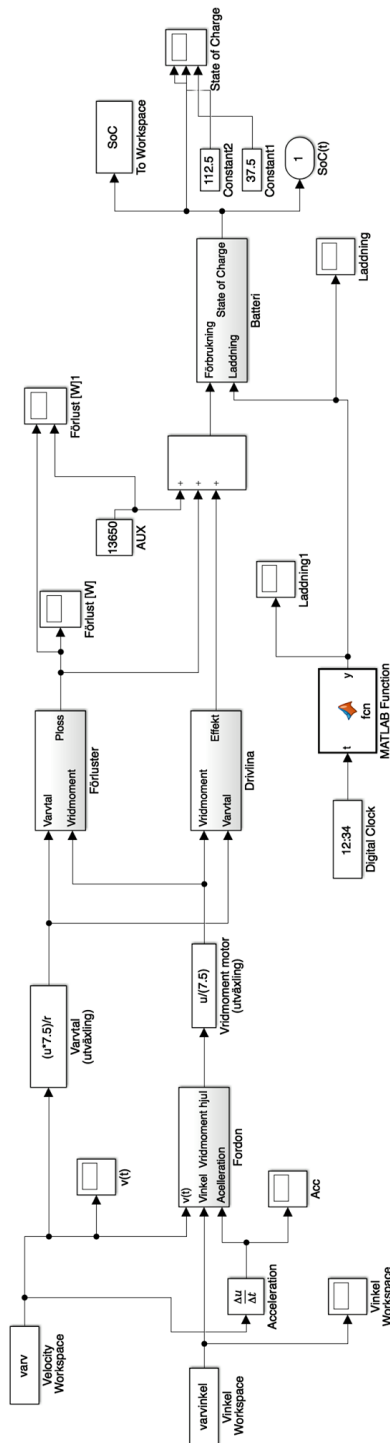
- [1] B. Saxton, *Lokal och regional kollektivtrafik 2015*, Trafikanalys, 2015, [Online]. Tillgänglig: <http://www.trafa.se/globalassets/statistik/kollektivtrafik/kollektivtrafik-2015.pdf?>. Hämtad: 22 mars, 2017.
- [2] S. Svanström, "Urbanisering-från land till stad," *Välfärd*, 2015, [Online]. Tillgänglig: http://www.scb.se/sv_/Hitta-statistik/Artiklar/Urbanisering--fran-land-till-stad. Hämtad: 22 mars, 2017.
- [3] B. Saxton, *Lastbilars klimateffektivitet och utsläpp*, Trafikanalys, 2015, [Online]. Tillgänglig: Hämtad från http://www.trafa.se/globalassets/rapporter/rapport-2015_12-lastbilars-klimateffektivitet-och-utslapp.pdf. Hämtad: 22 mars, 2017.
- [4] L. Magnusson, *Miljö- och Klimatstrategi för kollektivtrafiken i Västra Götaland*, Västra Götalandsregionen, 2013, [Online]. Tillgänglig: https://alfresco.vgregion.se/alfresco/service/vgr/storage/node/content/workspace/SpacesStore/879e5884-b7a4-49e4-a999-49a731a0ea6a/Miljö_och_Klimatstrategi_2013-01-31.pdf?a=false&guest=true. Hämtad: 22 mars, 2017.
- [5] Göteborgs Stad, "Mål-begränsad klimatpåverkan, www.goteborg.se," 2017, [Online]. Tillgänglig: <http://www.goteborg.se/wps/portal/start/miljo/goteborgs-tolv-miljomal/begransad-klimatpaverkan/om-begransad-klimatpaverkan/>. Hämtad: 22 mars, 2017.
- [6] B. Sandén & P. Wallgren, *Systems Perspectives on Electromobility*, 2nd ed. Göteborg, Sverige: Chalmers Tekniska Högskola, 2014, [Online]. Tillgänglig: <http://www.chalmers.se/en/areas-of-advance/energy/publications-media/systems-perspectives/Pages/default.aspx>. Hämtad: 22 mars, 2017.
- [7] A. Wersäll, *FRAMTIDENS BUSS ÄR ELEKTRISK*, Stockholms Handelskammare, 2015, [Online]. Tillgänglig: <https://www.chamber.se/rapporter/framtidens-buss-ar-elektrisk-2.htm>. Hämtad: 22 mars, 2017.
- [8] Västtrafik, "Blå express," 2016, [Online]. Tillgänglig: <https://www.vasttrafik.se/#!/reseinformation/linjer/bla-express-saro---goteborg---grabo/>. Hämtad: 12 maj, 2017.
- [9] M. Aldenius, E. Forsström, J. Khan & A. Nikoleris, *Elektrifiering av stadsbussar*, K2, 2016, [Online]. Tillgänglig: http://www.k2centrum.se/sites/default/files/fields/field_uppladdad_rapport/elektrifiering_av_stadsbussar_k2_wp_2016_12_0.pdf. Hämtad: 22 mars, 2017.
- [10] Å. Romson, "Stor efterfrågan på supermiljöbilspremien, www.regeringen.se," 2015, [Online]. Tillgänglig: <http://www.regeringen.se/artiklar/2015/07/stor-efterfragan-pa-supermiljobilspremien/>. Hämtad: 22 mars, 2017.
- [11] B. Nykvist & M. Nilsson, "Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles," *Nature Climate Change* 5, vol. 5, pp. 329–332, Feb. 2015, doi:10.1038/nclimate2564.
- [12] U. Nyström, "Minskat buller - ökat bussbuller, *GP*," 20 nov. 2013, [Online]. Tillgänglig: <http://www.gp.se/nyheter/goteborg/minskat-bilbuller-okat-bussbuller-1.609428>. Hämtad: 3 feb, 2017.
- [13] M. Holmes, *Kartläggning av trafikbuller i Göteborgs stad*, Göteborgs Stad, 2015, [Online]. Tillgänglig: <http://goteborg.se/wps/wcm/connect/>

- 61e0af2c-b880-403a-b0d7-71d7dc3c673e/Beskrivning_Bullerkartläggning+2013_version+20150903.pdf?MOD=AJPERES. Hämtad: 3 feb, 2017.
- [14] Spårvagnssällskapet, "Trådbuss stockholm, *www.sparvagnssallskapet.se*," 2017, [Online]. Tillgänglig: <https://www.sparvagnssallskapet.se/atlas/system.php?id=26>. Hämtad: 25 mars, 2017.
- [15] Scania, "Världens första elväg invigd i sverige, *www.scania.com*," 2016, [Online]. Tillgänglig: <https://www.scania.com/fi/sv/home/experience-scania/news-and-events/News/vaerldens-foersta-elvaeg-invigd.html>. Hämtad: 2 feb, 2017.
- [16] A. Grauers, "Personlig kommunikation," 2017.
- [17] S. Wagner, "Siemens tests ehighway system in california, *www.siemens.com*," 2014, [Online]. Tillgänglig: [http://www.siemens.com/press/en/feature/2015/mobility/2015-06-eHighway.php?content\[\]=MO#content-zone](http://www.siemens.com/press/en/feature/2015/mobility/2015-06-eHighway.php?content[]=MO#content-zone). Hämtad: 22 mars, 2017.
- [18] P. Nilsson, "Vem elektrifierar E4:an?, *DI*," 16 okt. 2016, [Online]. Tillgänglig: <http://www.di.se/opinion/pm-nilsson-vem-elektrifierar-e4an-1/>. Hämtad: 22 mars, 2017.
- [19] eRoadArlanda, "Elvägar - en hållbar transportlösning för framtiden, *www.eroadarlanda.se*," 2017, [Online]. Tillgänglig: <http://www.eroadarlanda.se/>. Hämtad: 29 mars, 2017.
- [20] Appm Managment Consults, *The inductive charging quick scan*, Netherlands Enterprise Agency & Ministry of Economic Affairs, 2014, [Online]. Tillgänglig: [https://www.rvo.nl/sites/default/files/2015/06/Rapport%20Inductieladen%20\(ENG\)%2015-05-12%20.pdf](https://www.rvo.nl/sites/default/files/2015/06/Rapport%20Inductieladen%20(ENG)%2015-05-12%20.pdf). Hämtad: 28 mars, 2017.
- [21] O. Olsson, *Slide-in Electric Road System, Inductive project report, Phase 1*, Viktoria Swedish ICT, 16 maj 2014, [Online]. Tillgänglig: https://www.viktoria.se/sites/default/files/pub/www.viktoria.se/upload/publications/slide-in_inductive_project_report_phase_1_0.pdf. Hämtad: 12 maj, 2017.
- [22] J. Lidicker, T. Lipman, & B. Williams, "Business model for subscription service for electric vehicles including battery swapping, for san fransisco bay, california," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2252, pp. 83–90, 2011, doi:10.3141/2252-11.
- [23] Y. Gao, K. Zhao & C. Wang, "Economic dispatch containing wind power and electric vehicle battery swap station," in *Transmission and Distribution Conference and Exposition (TD)*, 2012, doi: 10.1109/TDC.2012.6281680.
- [24] Proterra, "The proterra cataclyst, *www.proterra.com*," 2016, [Online]. Tillgänglig: <https://www.proterra.com/products/catalyst-40ft/>. Hämtad: 2 feb, 2017.
- [25] Volvo Bussar Sverige, "Volvo 7900 Electric, *www.volvobuses.se*," 2017, [Online]. Tillgänglig: <http://www.volvobuses.se/sv-se/our-offering/buses/volvo-7900-electric.html>. Hämtad: 3 feb, 2017.
- [26] A. Dinger, R. Martin, X. Mosquet, M. Rabl, D. Rizoulis, M. Russo & G. Stitche, *Batteries for electric cars*, The Boston COnsulting Group, 2010, [Online]. Tillgänglig: <https://www.bcg.com/documents/file36615.pdf>. Hämtad: 30 mars, 2017.

- [27] T. Thiringer & S. Haghbin, "Power quality issues of a battery fast charging station for a fully-electric public transport system in gothenburg city," *Batteries*, vol. 1, no. 1, pp. 22–33, 2015, [Online]. Tillgänglig: <http://www.mdpi.com/2313-0105/1/1/22>. Hämtad: 12 maj, 2017. [Online]. Available: <http://www.mdpi.com/2313-0105/1/1/22>
- [28] B. Xu, et.al., "Modeling of lithium-ion battery degradation for cell life assessment," *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9 juni 2016, doi:10.1109/TSG.2016.2578950.
- [29] J. Larminie & J. Lowry, *Electric Vehicle Technology Explained*. Chennai, India: John Wiley Sons, Ltd, 2012.
- [30] The Engineering Toolbox, "Rolling Resistance, [www.engineeringtoolbox.com](http://www.engineeringtoolbox.com/rolling-friction-resistance-d_1303.html)," 2017, [Online]. Tillgänglig: http://www.engineeringtoolbox.com/rolling-friction-resistance-d_1303.html. Hämtad: 25 april, 2017.
- [31] Volvo Buses, "Volvo 8900 - Din hårt arbetande partner, www.volvobuses.se," 2016, [Online]. Tillgänglig: <http://www.volvobuses.se/sv-se/our-offering/buses/volvo-8900/specifications.html>. Hämtad: 10 maj, 2017.
- [32] Nordling, C, Österman, J, *Physics handbook for Science and Engineering*, 6th ed. Lund, Sverige: Studentlitteratur, 2002.
- [33] D. Cheng, *Fundamentals of Engineering Electromagnetics*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc, 1993.
- [34] Movia, "Forsøg med store elbusser," 2016, [Online]. Tillgänglig: <https://www.trafikstyrelsen.dk/~media/Dokumenter/06%20Kollektiv%20trafik/Forsogsordningen/2013/Elbusser/Slutrapport.pdf>. Hämtad: 25 april, 2017.
- [35] G. Van Brummelen, *Heavenly Mathematics: The Forgotten Art of Spherical Trigonometry*. USA: Princeton University Press, 2012, [Online]. Tillgänglig: https://books.google.se/books?id=0BCCz8Sx5wkC&pg=PR7&redir_esc=y#v=onepage&q=haversine&f=false. Hämtad: 28 mars, 2017.
- [36] A. Bogomolny, "Equations of a Straight Line, www.cut-the-knot.org," 2017, [Online]. Tillgänglig: <http://www.cut-the-knot.org/Curriculum/Calculus/StraightLine.shtml>. Hämtad: 30 mars, 2017.
- [37] M.T. Heath, *Scientific Computing: An Introductory Survey*, 2nd ed. McGraw-Hill Higher Education, 2002.
- [38] A. Schrijver, *Theory of linear and integer programming*. Bath, Great Britain: John Wiley and Sons, 1998, [Online]. Tillgänglig: https://promathmedia.files.wordpress.com/2013/10/alexander_schrijver_theory_of_linear_and_integerbookfi-org.pdf. Hämtad: 4 maj, 2017.
- [39] R. Marinescu, R. Dechter, "Best-first and/or search for 0/1 integer programming," 2006, [Online]. Tillgänglig: <http://www.ics.uci.edu/~csp/r140.pdf>. Hämtad: 25 april, 2017.
- [40] Volvo Bus corp., "Volvo route recording," 2016, [Mobilapplikation]. Tillgänglig: <https://play.google.com/store/apps/details?id=se.consat.i4m.android.app.routescout.volvo&hl=sv>. Hämtad: 29 mars, 2017.
- [41] "Science for environment policy-environmental impacts of batteries for low carbon technologies compared," 2012, [Online]. Tillgänglig: <http://ec.europa>.

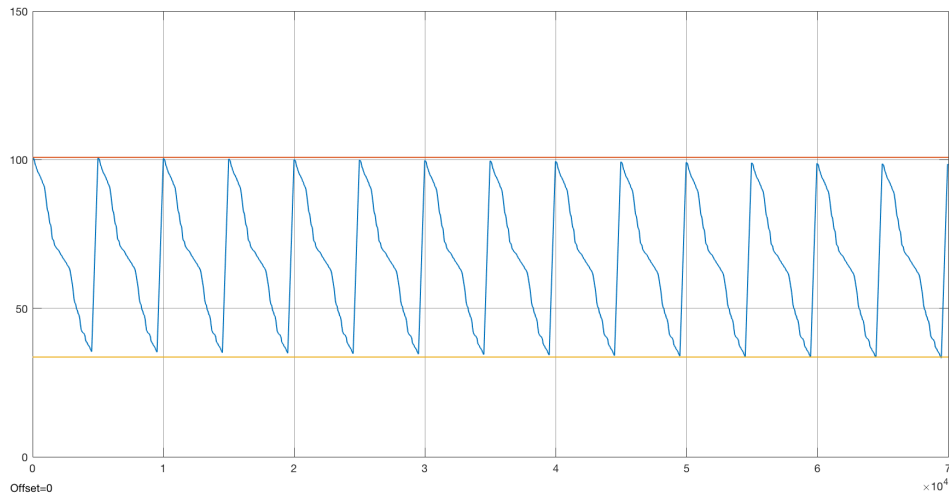
- eu/environment/integration/research/newsalert/pdf/303na1_en.pdf. Hämtad: 8 maj, 2017.
- [42] A. Kumar, "The lithium battery recycling challenge," 2011, [Online]. Tillgänglig: <https://waste-management-world.com/a/1-the-lithium-battery-recycling-challenge>. Hämtad: 12 maj, 2017.
- [43] S. Andersson, *Energianvändningen i gasbussar - nuläge och prognos*, Västra Götalandsregionen & Region Skåne, 2014, [Online]. Tillgänglig: <https://www.2050.se/files/Bilder:Artiklar%20och%20Rapporter/energieffektiviteten-i-gasbussar.pdf>. Hämtad: 8 maj, 2017.
- [44] Trafikverket, "Analysmetod och samhällsekonomiska kalkylvärden för transportsektorn: Asek 6.0," 2014, [Online]. Tillgänglig: http://www.trafikverket.se/contentassets/4b1c1005597d47bda386d81dd3444b24/10_buller_a60.pdf. Hämtad: 8 maj, 2017.
- [45] Svensk Kollektivtrafik, "Miljökrav vid trafikupphandling - buss," 2014, [Online]. Tillgänglig: http://www.svenskkollektivtrafik.se/globalassets/partnersamverkan/dokument/miljo-och-sakerhet/miljoprogrammet/miljokrav_buss_2014.pdf. Hämtad: 8 maj, 2017.
- [46] Electricity, "Statusrapport 2016," 2016, [Online]. Tillgänglig: <http://www.goteborgelectricity.se/node/41897>. Hämtad: 8 maj, 2017.
- [47] Bussmagasinet, "Svensk premiär för förarlösa bussar," 2016, [Online]. Tillgänglig: <http://www.bussmagasinet.se/2016/04/svensk-premiar-for-forarlosa-bussar/>. Hämtad: 10 maj, 2017.

A Bussmodell i simulink



Figur 21: En helhetsbild över simuleringsmodellen i *Matlab Simulink*

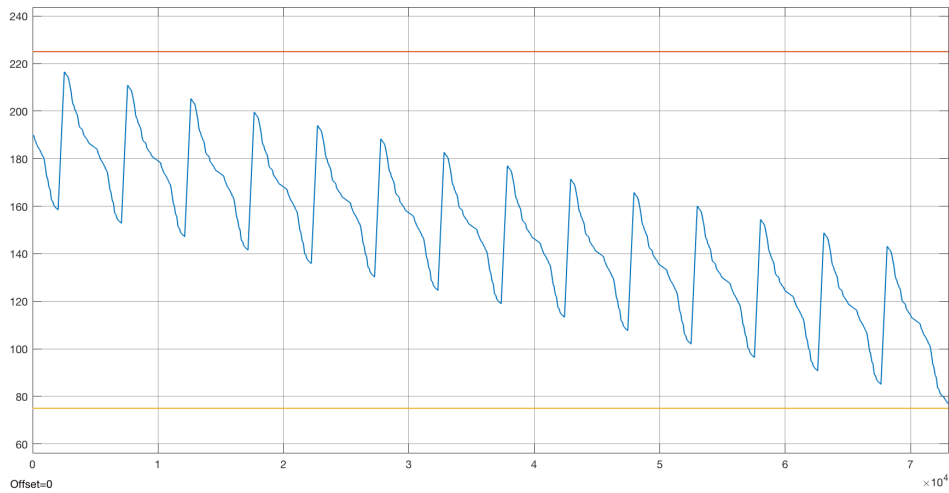
B Övriga laddningsalternativ



Figur 22: State of Charge för laddningsalternativet

Tabell 10: Egenskaper för alternativ hållplatsladdning

Batteristorlek [kWh]	Ändhållplats [min]	Mellanladdning [s]	Mellanladdning [antal]
136.36	8	25	0

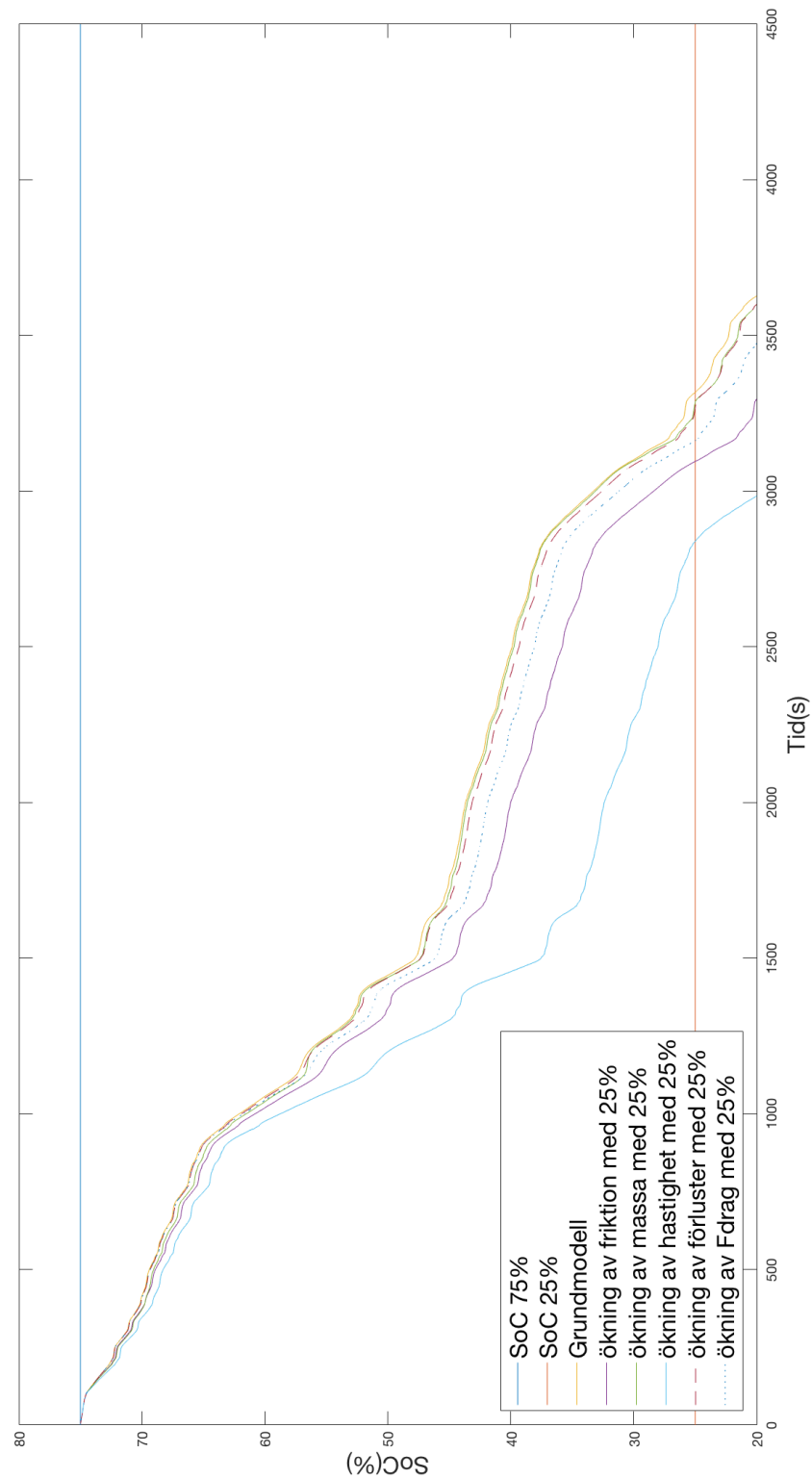


Figur 23: State of Charge för laddningsalternativet

Tabell 11: Egenskaper för alternativ elväg

Batteristorlek [kWh]	Elväg [km]	Elväg [min]	Elväg [antal]
300	2.368	8.98	1

C Känslighetsanalys



Figur 24: Känslighetsanalys av olika variabler