Masteruppsats i Electrical Engineering
Institutionen för systemteknik, Linköpings universitet, 2025

Byggarbetsplats i omställning – modellering och simulering av laddstrategier för elektrifierade fordon

Karin Gagnerud

LINKÖPING UNIVERSITY

Masteruppsats i Electrical Engineering

Byggarbetsplats i omställning – modellering och simulering av laddstrategier för elektrifierade fordon

Karin Gagnerud

LiTH-ISY-EX--YY/NNNN--SE

Handledare: **Daniel Jung**
ISY, Linköpings universitet
Malin Hansson
Skanska

Examinator: **Christofer Sundström**
ISY, Linköpings universitet

Division of Automatic Control
Institutionen för systemteknik
Linköping University
581 83 Linköping

Copyright © 2025 Karin Gagnerud

Sammanfattning

Detta examensarbete undersöker hur laddinfrastruktur för elektrifierade tunga fordon bör dimensioneras vid byggarbetsplatser. Arbetet är baserat på verklig data från Skanskas projekt E02 i Slakthusområdet och syftar till att ge insikter som kan användas som underlag för framtida tillämpningar av datadrivna beslut inom verksamheten. Genom simuleringar i Python utvecklas en optimeringsmodell som analyserar hur laddningsrutiner påverkar elbehovet och dimensioneringen av energilagring. Med hjälp av Monte Carlo-simuleringar genereras olika laddprofiler som sedan integreras i optimeringsmodellen. Resultaten visualiseras i form av uppskattningar av hur energilagringsbehovet i en verksamhet varierar vid förändringar av antalet fordon och hur laddningsrutiner av dessa fordon kan se ut för optimera behovet av energilagring.

Utifrån optimeringen kan slutsatsen dras att kapacitetskravet på batterilagring kan minska om laddningstider kan justeras. Studien visar att de metoder som företaget Skanska använder sig av idag för att dimensionera system för laddning av elektrifierade fordon riskerar att leda till överdimensionering av kostsam batteriinfrastruktur. Arbetet föreslår istället ett helhetsperspektiv vid dimensionering av laddinfrastruktur, där laddningsmönster och effektprofiler optimeras för att uppnå ett mer kostnadseffektivt system. Sammanfattningsvis utvecklas i detta arbete förslag på metoder som kan användas vid analys av mätdata från elektrifierade bygg- och anläggningsprojekt. Genom att kombinera verklig mätdata med Monte-Carlo simulerade värden genereras insikter i verksamhetens energianvändning och hur laddinfrastruktur och rutiner för laddning kan optimeras för att minimera behovet av kostsamma energilagringssystem.

Abstract

This thesis investigates how charging infrastructure for electrified heavy-duty vehicles should be dimensioned on construction sites. The study is based on real-world data collected from Skanska's E02 project in the Slakthusområdet, Stockholm, and aims to provide insights that support data-driven decision-making for future electrification efforts in the construction industry.

Using simulations in Python, an optimization model is developed to analyze how charging routines influence electricity demand and the dimensioning of energy storage systems. Monte Carlo simulations are used to generate a wide range of charging profiles, which are then integrated into the model to evaluate how energy storage needs vary depending on the number of vehicles and their charging behavior.

The results indicate that battery storage capacity can be significantly reduced if charging schedules allow for flexibility in start times. The study shows that current planning methods—focused on peak loads—risk costly overdimensioning of battery systems. Instead, a more holistic approach is recommended, where charging profiles and power demand are optimized to create more cost-effective systems.

By combining real operational data with simulated scenarios, the study presents methods that can be used to analyze energy usage in construction projects and to optimize charging routines and infrastructure in order to minimize reliance on expensive energy storage.

Tack

Jag vill rikta ett stort tack till alla som på olika sätt har bidragit till att detta examensarbete kunnat genomföras.

Ett särskilt tack till Alice Helander, för ditt ovärderliga stöd, för alla givande samtal – och för de många kaffekopparna vi delat på Skanskas huvudkontor. Din närvaro har gjort arbetet både roligare och lättare.

Jag vill även tacka min handledare Daniel Jung för din teoretiska vägledning som har hjälpt mig att komma vidare under arbetets gång.

Slutligen ett stort tack till Malin Hansson för att du har välkomnat oss till Skanska och skapat goda förutsättningar för mig att realisera detta projekt.

Linköping, Juni 2025
Karin Gagnerud

Innehåll

1 Introduktion **1**
1.1 Fallstudie . . . 2
1.1.1 Nuvarande metoder för dimensionering av laddinfrastruktur . . . 3
1.2 Syfte . . . 4
1.3 Frågeställningar . . . 4
1.4 Avgränsningar . . . 5
1.5 Tidigare studier . . . 5
1.5.1 Decentraliserad styrning . . . 5
1.5.2 Centraliserad styrning . . . 6

2 Bakgrund **7**
2.1 Elanvändning i konstruktionsbranschen . . . 7
2.2 Eldrivna konstruktionsmaskiner . . . 7
2.3 Laddningsmetoder . . . 8
2.3.1 Stationära batterier . . . 9

3 Teori **11**
3.1 Matematisk modellering och optimering . . . 11
3.1.1 Optimeringsmetoder . . . 11
3.2 Implementering av optimeringsmodeller i Python . . . 12
3.2.1 Linjärprogrammering . . . 12
3.2.2 Differential evolution . . . 12
3.3 Monte Carlo simuleringar . . . 13
3.3.1 Inverse transform sampling . . . 13

4 Dataanlays **15**
4.1 Mätdata . . . 15
4.1.1 Kvalitén på mätdata . . . 15
4.1.2 Datainnehåll och format . . . 16
4.1.3 Inläsning av data . . . 16
4.2 Sammanställning av data . . . 16
4.2.1 Laddningsrutiner . . . 16

4.2.2 Energiuttag för enskilda fordon 19
4.2.3 Totala energiuttag 20

5 Modellering 23
5.1 Modelleringsmiljö 23
5.2 Generering av laddningsprofiler 23
5.3 Modellbeskrivning och val av målfunktion 24
5.4 Variabelförteckning 25
5.5 Modellering av batteri 26
5.5.1 Slutgiltig modell 26
5.5.2 Implementering i Python 27

6 Simuleringsmetoder 29
6.1 Simuleringar av batteristorlek 29
6.1.1 Varierande laddningskapacitet 29
6.1.2 Variationer i starttid 30
6.2 Monte Carlo simuleringar 30
6.2.1 Direkt sampling 31
6.2.2 Sampling utifrån fördelning 32
6.2.3 Generering av laddningsprofiler 33
6.3 Testade fall 34
6.3.1 Totalt energiuttag för samtliga fordon 34
6.3.2 Variationer i starttider 34
6.3.3 Storlek på fordonsflotta 34
6.3.4 Ökad spridning av starttider 34

7 Resultat och analys 37
7.1 Laddningsprofil 38
7.1.1 Optimal batteristorlek med olika nätanslutningar 39
7.2 Optimering av starttider 40
7.3 Utfall från Monte-Carlo simuleringar 42
7.3.1 Tillägg av maskiner 43
7.3.2 Spridning i variationer av starttid 44
7.3.3 Maxeffekt och tider för laddning 45

8 Metoddiskussion 47
8.1 Monte-Carlo-simuleringar 47
8.2 Modellering 49
8.2.1 Alternativa modelleringsmetoder 49

9 Slutsatser 53

Litteraturförteckning 55

1

Introduktion

Bygg och anläggningsarbeten är en bransch med ett omfattande ekologiskt fotavtryck. FN uppskattar att över 37% av de globala utsläppen av växthusgaser sker vid konstruktionsarbeten[1] och i Sverige är motsvarande siffra 22%.[2] Den största andelen av utsläppen sker vid tillverkning av byggmaterial, avfallshantering och fossil förbränning i arbetsmaskiner. I Sverige har därför flera initiativ tagits för att minska utsläppen i branschen. Bland annat har projekt initierats för att effektivisera materialanvändning, nya mer hållbara material har introducerats på marknaden och en del av det fossila bränslet har ersatts med biobränsle eller el.[25] Som en konsekvens av dessa initiativ minskade utsläppen från svenska byggindustri mellan åren 2024-2025 med 10%.[2] Det är dock en lång väg kvar att gå tills EU:s mål om klimatneutralitet vid 2025 uppnås. För att detta ska ske behöver hållbarhetsarbeten fortsätta att prioriteras i branschen.

Utsläpp från förbränning av diesel och bensin i konstruktionsmaskiner står för 12% av de totala växthusgasutsläppen från bygg och anläggningsprojekt i Sverige.[25] Det är därför viktigt att mer hållbara bränslen utvecklas för att utmana de traditionella förbränningsmotorerna. Lovande alternativa drivmedel till diesel och bensin är bland annat biobränsle och elektricitet.[12] Då utbudet av biobränsle förväntas vara begränsat satsas resurser på utveckling av elektrifierade fordon. Nya typer av elmaskiner introduceras på marknaden och utvecklingen går fort framåt.[24] Att använda elmaskiner är inte bara fördelaktigt utifrån ett utsläppsperspektiv. Det leder till exempel även till lägre bullernivåer, förbättrad energieffektivisering som en följd av snabbare reglering och förbättrad luftkvalitet.[11] Studier har även visat att elektriska konstruktionsmaskiner är mer tåliga vilket möjliggör kostnadsbesparingar för underhåll och service.[18] Tack vare kontinuerlig förbättring av prestanda och prisbild av elektriska konstruktionsmaskiner anses de vara en lämpligt konkurrent till dagens fossildrivna konstruktionsmaskiner.[18]

Vid introduktion av elektrifierade maskiner på en byggarbetsplats krävs det att området förses med tillräcklig elektricitet för att möta verksamhetens ökade elbehov. Till skillnad från fordon som verkar på det offentliga vägnätet, där infrastruktur för laddning av elektriska fordon kontinuerligt utvecklats, är tillgången på laddplatser ofta bristande vid nya bygg och anläggningsprojekt.[26] Då konstruktionsmaskiner behöver klara av tunga lyft och vidhålla god prestanda under långa arbetspass förbrukar de mycket energi.[18] Dessutom behöver laddningen anpassas till specifika arbetsscheman då fordonen snabbladdas under arbetarnas raster. Laddinfrastrukturen behöver alltså dimensioneras för att leverera höga effektuttag och förse flera fordonsenheter med energi samtidigt.[29]

Höga effektuttag kan leda till volatilitet i elnätet och om den lokala elleverantören inte tillåter denna typ av nätanslutning kan verksamheten behöva investera i energilagringssystem med batterienheter.[15] Energilagringssystemet fungerar som en buffert som laddas med en lägre effekt från nätet för att sedan kunna förse fordonen med högre effektuttag utan att överbelasta nätet. Ansvaret för att förse en byggarbetsplats med ett sådant typ av laddningssystem ligger idag på en enskilda entreprenaden och medför höga kostnader.[14] Det är därför viktigt att batterienheternas storlek dimensioneras utefter byggarbetsplatsens behov.

Marknaden för elektriska fordon befinner sig i ett tidigt skede och det finns idag få bygg- och anläggningsprojekt i Sverige som använder sig av elektrifierade fordon.[25] I framtiden förväntas allt fler industrier elektrifiera sina system för att ersätta fossila bränslen.[29] Efterfrågan på elektricitet kommer att öka och investeringar behöver göras för att minska risken för obalans i elnätet. Det är därför troligt att problemen kring lokala höga effektuttag består och att behovet av energilagringssystem kommer att vara ett viktigt komplement vid elektrifierade byggarbetsplatser i framtiden.[15] För att minska risken för onödiga kostnader från över eller underdimensionering av energilagringssystem behöver effektiva metoder för dimensionering av dessa typer av system utvecklas och brister i nuvarande system analyseras.

1.1 Fallstudie

Den globala byggkoncernen SKANKSKA bedriver idag ett bygg och anläggningsprojekt med elektrifierade fordon i Slakthusområdet i södra Stockholm. I projektet, som är ett väg- och anläggningsprojekt, används sex olika elektrifierade fordon. Dessa specifika fordon beskrivs i Tabell 1.1. Eftersom användningen av elektrifierade tunga fordon i byggbranschen ännu är i sin linda vill företaget nu dra lärdomar från projektet som har pågått sedan September 2024. Bland annat behöver metoder utvecklas för att förutspå effektbehovet som verksamheten kommer att ha och dimensioneringen av infrastrukturen behöver optimeras. I detta delkapitel presenteras en sammanfattning om hur verksamhetens användning av elektrifierade fordon ser ut och hur laddningssystem har dimensionerats.

Tabell 1.1: Elektrifierade maskiner på byggarbetsplatsen

Namn	Fordonstyp	Modell	Tillverkare
ABT Scania	Lastbil	25P	Scania
Liu Gong	Lastbil		LiuGong
Volvo Bellmans	Schaktbil		Volvo & Bellmans
Ellen	Grävmaskin	EC230	Volvo
Elton	Grävmaskin	EC230	Volvo
Volvo L120	Hjullastare	L120	Volvo

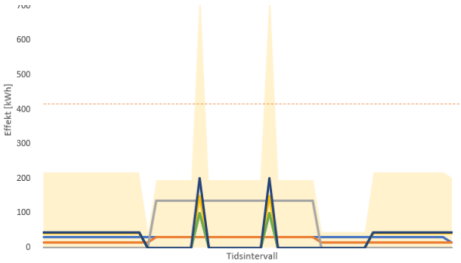
1.1.1 Nuvarande metoder för dimensionering av laddinfrastruktur

För att säkerställa att effektbehovet för alla elmaskiner skulle kunna tillgodoses dimensionerades laddinfrastrukturen utefter uppskattat behov. Den norska karaftbolaget Eviny hyrdes in för att genomföra uppförande av laddinfrastrukturen[3]. I de initiala faserna av planeringen undersöktes hur många nätstationer och tillhörande strömstyrka som finns tillgänglig på platsen. Sammanlagt finns 600 A, vilket ger ett maximalt effektintag på 416 kW. Tabell 1.2 visar det underlag som användes vid planering av laddinfrastrukturen. Förutom mobila maskiner behöver elsystemet dimensioneras för bodar, byggström och de stationära sorteringsverken.

Tabell 1.2: Översikt över de eldrivna enheterna på byggarbetsplatsen och verksamhetens förväntade elanvändning. Informationen används idag som underlag vid planering och dimensionering av laddinfrastrukturen.

Utrustning	Förbrukning	Tid
Bodar	30kW	Hela dygnet
Byggström	30/15kW	6:30-16/16-6:30
2 Sorteringsverk	68kW	6:30-16
Grävmaskin EC320	190/44	9-9:30 + 13-13:30/ 18-6
Grävmaskin Volvo EC230	150/44	9-9:30 + 13-13:30/ 18-6
Hjullastare Volvo L120	150/44	9-9:30 + 13-13:30/ 18-6
2 lastbilar	150/22kW	9-9:30 + 13-13:30/ 18-6

Från Tabell 1.2 skapades en graf som illustreras i Figur 1.1 för att förutspå verksamhetens totala effektbehov. Två gånger per dygn identifierades effekttoppar som överskred det maximala effektuttaget som tillåtits från nätleverantören.



Figur 1.1: *Figuren visar det effektbehov som finns under ett verksamhetsdygn. Linjerna representerar de olika systemen som anges i tabell 1.2. Det gula området är summan av det momentana effektbehovet som finns i verksamheten.*

Utifrån den effektkartläggning som genomfördes förväntades effekttopparna bli för stora för att kunna tillgodoses med hjälp av de tillgängliga nätanslutningarna, se Figur 1.1. Därför beslutades det att batterier skulle installeras vid två olika nätanslutningar på platsen. Batteripacken som används har en kapacitet på 230 kWh/275 kW.

1.2 Syfte

Syftet med denna studie är att analysera den data som kontinuerligt samlats in från laddstationerna vid bygg- och anläggningsprojektet i Slakthusområdet. Genom att sammanställa och analysera denna information skapas ett underlag som kan användas för planering och dimensionering av framtida verksamheter med eldrivna maskiner. Ett centralt mål i projektet är att utveckla optimeringsmodeller som kan användas för att uppskatta de optimala dimensionerna för laddinfrastruktur vid byggnationsprojekt och hur dessa dimensioner påverkas av förändringar i fordonsflottan eller laddningsrutiner. Dessa modeller syftar till att stödja beslutsfattande hos byggentreprenörer. Modellen som tas fram tillämpas specifikt på Skanskas projekt i Slakthusområdet.

1.3 Frågeställningar

För att uppnå projektets syfte utvecklas en simuleringsmodell och data sammanställs för att besvara följande frågeställningar:

- Hur ser energibehovet från elektrifierade fordon ut vid ett bygg- och anläggningsprojekt?
- Hur påverkas dimensionering av laddinfrastruktur av förändringar i fordonsflottan?
- Hur kan rutiner kring laddning av fordon optimeras för att minimera behovet att energilagring?

1.4 Avgränsningar

Projektet avgränsas till att endast undersöka laddningen för självförsörjande elektrifieringsprojekt. Alltså tas inte hänsyn till om fordon laddas utanför projektets egna laddinfrastruktur. Alternativa laddningsmetoder, såsom mobil laddning eller kabelanslutning under drift, omfattas inte i heller projektet. Då ingen data finns tillgänglig för lågeffektladdning som sker över natten utesluts denna typ av laddning i analysen.

All mätdata som används som underlag för analyserna har hämtats från projektet Skanska E01 och E02 i Slakthusområdet. Då data från fordonet LiuGong inte inkluderas i dataserien begränsas erfarenheter från projektet till att undersöka laddningsmönster för endast fem av de elektriska maskiner som brukas på arbetsplatsen.

1.5 Tidigare studier

Det finns många tidigare studier som har tillämpat matematiska modeller för att utvärdera hur laddningsmetoder för elektriska fordon bör utformas.[27] Däremot finns det färre studier som tittat på hur laddningen av tyngre fordon som verkar utanför vägnätet bör optimeras.[13] För att använda elektrifierade konstruktionsfordon är entreprenaden både elkonsument och ansvarig för infrastrukturen för eldistributionen. Således har entreprenader med eldrivna fordon inom byggbranschen andra intressen än de aktörer som bedriver sin verksamhet med fordon som åker längs det allmänna vägnätet.[14] Målfunktioner och begränsningar i modellen behöver därför anpassas till dessa förutsättningar.[26]

Syften och metoder för hur laddning av elektriska fordon ska optimeras ser olika ut beroende på från vilket perspektiv studien utformas. De främsta intressenterna som opererar med laddning av fordon är fordonsägaren, nätägaren och nätleverantören[27]. En optimering av ett system utifrån fordonsägarens intresse skulle kunna handla om att minska laddningskostnaden och kötider. Nätleverantören är istället mån om att öka vinsten och minska kostnader för laddinfrastruktur och underhåll. För den tredje aktören, nätägaren, skulle ett optimerat laddningssystem undvika för höga belastningar på elnätet[27]. Beroende på från vilken intressents perspektiv som studien utgår från formuleras olika målfunktioner[4].

1.5.1 Decentraliserad styrning

De flesta studier som optimerar laddning av fordon har utförts utifrån nätägarens eller fordonsägarens perspektiv. Ett exempel på en metod där ömsesidig nytta kan uppnås är genom så kallad *peak shaving* eller *valley shifting*.[4] Detta innebär att laddningen av elfordon förflyttas till tider då det är lägre efterfrågan, vilket resulterar i att fordonsägare får en lägre kostnad samtidigt som effekttoppar minskas.[4] Denna typ av decentraliserad optimering tar alltså fram förslag om hur elanvändare bör anpassa sina beteenden utifrån nätets förutsättningar. Al-Alwash skriver i en litteraturstudie om optimering av eldrivna fordon att de

flesta desorienterade studier som genomförts använder sig av linjära programmeringsmetoder och har en målfunktion om att minska kostnader vid laddning[4].

1.5.2 Centraliserad styrning

Centraliserad styrning är ett samlingsbegrepp för de strategier som används där systemets centrala begränsningar beaktas. Inom laddningsoptimering innebär detta att modellen formuleras med hänsyn till den tillgängliga laddinfrastruktur och kapacitet som finns i systemet.[27] I dessa typer av studier uppskattas i regel den förväntade efterfrågan som systemet sedan optimeras utefter. Denna uppskattning kan antingen göras genom sannolikhetsprofiler eller utifrån realdata där specifika scenarion och fordon modelleras[27]. Wu et.al. skapade en sannolikhetsmodell för belastningen på nätet som representerade en efterfrågeprofil, sedan användes denna profil som grund för att slumpmässigt uppskatta den momentana efterfrågan genom Monte Carlo-metoden[27]. Prekasch et al. genomförde ett liknande projekt där fordonens SOC istället uppskattades i en sannolikhetsfördelning[20]. Potentiella syften med dessa typer av optimeringar med centraliserad styrning har handlat om att minska laddningstider, förbättra batterianvändning och öka intäkter för laddningsenheter[20] [7][10]. Dessa typer av desorienterade optimeringar är enligt Al-Alwash ofta dynamiska för att problemen är mer komplexa. Exempel på dynamiska metoder som kan användas är att lösa problemen med hjälp av rekursiva subproblem eller med heuristiska antaganden[4]. Det finns många studier som förmedlar resultat om desorienterad styrning där konsumenter ska anpassa sina laddningsbeteenden. Däremot är utbudet för studier med desorienterad styrning, då dimensioner för laddinfrastrukturen anpassas, ej lika vanligt förekommande. Målfunktioner för dessa typer av optimeringar behöver utvecklas för att kunna skapa bättre förutsättningar för nätoperatörer och nätägare[27].

2

Bakgrund

I detta kapitel beskrivs hur elektrifierade fordon och de tillhörande systemen av laddinfrastruktur inom bygg och konstruktion fungerar idag.

2.1 Elanvändning i konstruktionsbranschen

Elektricitet är en viktig del för att bedriva en byggarbetsplats. Detta eftersom till exempel byggbodar, elmaskiner och belysningssystem drivs på elektricitet. När en konstruktionsanläggning påbörjas är elförsörjningen därför en del av planeringen. Vissa arbetsplatser ligger långt ifrån tillgängliga nätanslutningar och elförsörjningen kan därför vara en komplicerad fråga. Kablar kan behöva dras för att tillhandahålla ström till arbetsplatsen. Dessa kablar kan vara kopplade till aggregat eller till ett närliggande elnät. Elen som används på en byggarbetsplats benämns som *byggel*. När efterfrågan på elektricitet ökar vid bygg och anläggningsprojekt i samband med att elektriska fordon introduceras på platsen blir tillförseln av *byggel* än mer central för projektets framgång.

2.2 Eldrivna konstruktionsmaskiner

Kommersialiseringen av eldrivna konstruktionsfordon går framåt. Marknaden för lastbilar, är tack vare utvecklingen inom transportsektorn, stor.[29] Under de senaste åren har även elektriska grävmaskiner serieproducerats.[26] Den enda svenska leverantören är Volvo, men internationellt finns ett antal fler kommersiella producenter av elektriska grävmaskiner.

Att utvecklingen av elektriska fordon har varit positiv under de senaste åren beror främst på att laddinfrastruktur längs motorvägar har byggts ut samtidigt som fordonens räckvidd har ökat.[23] Däremot har inte samma utveckling skett

för fordon som i huvudsak brukas utanför det allmänna vägnätet, såsom lantbruksmaskiner och konstruktionsmaskiner.[26] Detta beror på att dessa typer av fordon har andra förutsättningar för att elektrifieras eftersom lämplig laddinfrastruktur behöver tillhandahållas. Detta ställer krav på att maskinägare behöver investera i planering och dimensionering av laddinfrastruktur.[14] Kostnaden för infrastrukturen kan vara mycket omfattande och är därför ett hinder för utökad elektrifiering av fordon i konstruktionssektorn.[23] Fredriksson et.al. menar att incitamenten för att investera i intern provisorisk laddinfrastruktur hade varit högre om upphandlingen i konstruktionsbranschen inte hade skett i etapper. Om entreprenader hade varit säkra på att de ska bedriva byggprojekt på en plats under en ännu längre tidshorisont hade fler resurser allokerats till lokala stödsystem.[14] Andra risker med att använda elektrifierade fordon är att det lokala nätet måste leverera tillräckligt med kapacitet för att stödja maskinernas behov.[27] Byggprojekt kan vara förlagda på avskilda platser och det är inte garanterat att en nätanslutning finns tillgänglig.[26]

2.3 Laddningsmetoder

Laddningsinfrastruktur för elektrifierade fordon kan se ut på många olika sätt. Stationära enheter kan vara direktuppkopplade till nätet med hjälp av en kabel. För mer mobila enheter installeras en energilagringsenhet på fordonet som laddas periodvis genom uppkoppling till nätet.[26] Det finns också en möjlighet att markant minska lagringsenhetens storlek för mobila maskiner genom att kombinera lagringsenheten med en direkt nätuppkoppling. På grund av begränsningar i storlek på energilagringsenheter och behovet av höga effektuttag måste större maskiner vara direktuppkopplade till nätet.[18] Detta begränsar möjligheten för att elektrifiera stora mobila enheter. I regel förflyttar sig fordon till stationära laddstationer för att ladda upp, men för fordon som har svårt att förflytta sig kan mobila laddningsenheter komma till platsen och förse fordonen med ström[18]

Laddning av fordon kan ske under längre perioder med låga effektuttag, eller genom så kallad snabbladdning med högre effektuttag. Eftersom konstruktionsmaskiner förbrukar mycket energi och behöver vara i drift under långa arbetsdagar krävs det ofta att nattladdning kompletteras med snabbladdningar under dagen. På många platser är nätet inte dimensionerat för att hantera de höga effektuttag som konstruktionsmaskiner efterfrågar[27]. Entreprenaden handlar el genom avtal där det maximala effektuttaget som tillåts är specificerat. Om fordonen laddar med en för hög effekt kan nätägaren slå till säkerhetsbrytaren eller fakturera kostsamma effekttariffer[23]. Detta tak beror på att för höga effektuttag innebär många risker såsom minskad spänning, ökad obalans, överanvändning av komponenter i systemet såsom kablar och transformatorer och ökade kraftförluster.[15] För att kunna ladda med högre effekter installeras därför batterier vid de stationära laddstationerna. Batterierna kan lagra energi och laddas direkt från nätet.[26] Med hjälp av batterier kan elektriska tunga fordon laddas snabbare utan att det sker för stora påfrestningar på nätet.[15]

2.3.1 Stationära batterier

Batterier på konstruktionsprojekt kan användas för att leverera högre effektuttag utan att generera obalans i det lokala elnätet. Det finns även andra fördelar med batterienheter. De kan till exempel agera som en extra buffert vid strömavbrott, eller användas för att balansera elnät och därmed generera en inkomst på stödmarknader.[28] Batterier som används som stationära lagringsenheter på byggarbetsplatser är i regel litiumbatterier. Litiumbatterier är fördelaktiga eftersom det är det kommersiella batteriet med högst energidensitet, kraft och kapacitet till många cyklar. Tack vare tekniska framsteg och ökad kommersialisering har priset för litiumbatterier sjunkit.[6]

Marknaden för elhandel med *Time Shifting*, alltså att använda energilagringssystem där laddning eller försäljning av el anpassas utefter rådande elpriser, är en marknad som förväntas bli allt mer ekonomiskt fördelaktigt i framtiden.[4] För att prisbilden för elektricitet som drivmedel från stationära batterier ska förbättras behöver kostnaderna sjunka eller intäkterna öka, exempelvis genom regleringsstöd, teknikutveckling eller förbättrad integration med elmarknaden. Först då kan stationära batterier bli ett konkurrenskraftigt alternativ för energilagring på bygg- och konstruktionsprojekt.[3]

3

Teori

I teorikapitlet presenteras de teorier som kan användas som kan användas som grund för att utveckla en matematisk modell för att modellera principer för laddinfrastruktur av elektriska fordon.

3.1 Matematisk modellering och optimering

För att förutspå laddbehovet för eldrivna fordon i byggbranschen kan man använda matematiska modeller som speglar verksamheten. Modellering innebär att man skapar en förenklad representation av verkligheten, anpassad efter ett specifikt syfte. Arbetet börjar med att identifiera ett problem och formulera relevanta frågeställningar. För att hålla modellen hanterbar görs antaganden som begränsar komplexiteten men samtidigt bevarar de viktigaste delarna av verkligheten. Därefter översätts modellen till matematiska uttryck. För att modellen ska vara användbar krävs både matematisk kunskap och förmåga att lösa problem. Resultaten kan ge insikter om hur verkliga situationer fungerar. Om modellen innehåller en tidsaspekt används simuleringar för att studera förändringar över tid. Det är viktigt att granska resultaten kritiskt. Om de inte stämmer överens med verkligheten, behöver modellen justeras tills den ger mer rimliga och användbara utfall.[30]

3.1.1 Optimeringsmetoder

Matematiska tillämpningar kan ske genom optimeringsalgoritmer. Optimering används för att maximera eller minimera funktioner i ett system och resultatet kan därför användas som beslutsunderlag i till exempel designprocesser. En optimeringsmodell består i regel av en målfunktion, bivillkor och begränsningar.

Målfunktionen bestäms utifrån modellens syfte. Exempel på ett sådant syfte är att minimera kostnader eller maximera snabbhet. [19]

Optimering innebär att en systematiskt sökmetod implementeras för att finna det optimala tillståndet, alltså globala eller lokala extrempunkter, utifrån en viss målfunktion, begränsningar och bivillkor. Hur denna sökmetod ser ut kan variera beroende på vilket typ av system som optimeras. Matematiker använder en uppsjö av modeller för att söka efter den optimala lösningen för olika system. Således behöver optimeringsmetoden anpassas efter problemets natur.[17] Optimum finns vid de variabelvärden som bäst uppfyller målfunktionen och samtidigt inte överskrider några begränsningar.[19]

3.2 Implementering av optimeringsmodeller i Python

Ett effektivt sätt att genomföra komplexa beräkningar är att implementera den matematiska modellen i ett programmeringsspråk och använda lämpliga verktyg och bibliotek för att lösa problemen. Python är ett allmänt programmeringsspråk som lanserades 1991. Eftersom det är öppen källkod finns idag ett stort utbud av tilläggspaket och bibliotek som kan tillämpas inom en mängd olika områden[21].

Ett av de mest centrala biblioteken för matematisk modellering är *SciPy*, som används för vetenskapliga och tekniska beräkningar. Inom *SciPy*-paketet finns modulen *SciPy Optimize*, som innehåller ett flertal kraftfulla lösare för att hantera olika typer av optimeringsproblem. Genom att använda dessa verktyg kan avancerade modeller implementeras och analyseras på ett effektivt och tillförlitligt tillvägagångssätt[8].

3.2.1 Linjärprogrammering

I linjära optimeringsproblem är både målfunktion och bivillkor linjära. Alltså finns ett direkt och konstant samband mellan variabler. Sökmetoder för linjära problem tenderar att vara direkta och strukturerade. Vilket leder till att dessa typer av problem är relativt enkla och effektiva att lösa. För implementering i Python kan funktionen *linprog* i *Scipy* användas, där standardlösaren är en *Revised Simplex Method*, vilket är en mer avancerad form av Simplex-metoden.

3.2.2 Differential evolution

Differential evolution är en simpel populationsbaserad stokastisk evolutionsalgoritm. Metoden använder skalade skillnader från tidigare lösningssteg som en mutationsoperator för att generera nästa generations lösningar för global optimering. Metoden introducerades av Storn och Price år 1991 som presenterade fem mutationsstrategier, vilka på senare tid har utökats av andra matematiker. Standardalgoritmen för differential evolution innebär att en grupp av N lösningar inom sökområdet initialiseras slumpmässigt. Den slumpmässiga genereringen kan genomföras likformigt, eller utifrån en särskild fördelning. Nya värden genereras genom en process som kallas **mutation** och genomförs utifrån den valda

mutationsstrategin. Den mest grundläggande och vanligaste strategin kallas DE/-rand/1. Den innebär att för varje lösning $\vec{x_{r1}}$ i populationen skapas en ny lösning $\vec{v_i}$ genom att tre slumpmässigt valda nya lösningar genereras enligt:

$$\vec{v_i} = \vec{x}_{r1} + F_{xc}(\vec{x_{r2}} - \vec{x_{r3}}) \tag{3.1}$$

Där r är en variabel som väljs slumpmässigt. Vektorerna $\vec{x_{r1}}$, $\vec{x_{r2}}$ och $\vec{x_{r2}}$ är alltså tre olika slumpmässiga lösningar och F_{xc} är en skalfaktor som styr hur skillnader mellen två lösningar påverkar mutatuinens resultat.

Andra vanliga mutationsstrategier är DE/best där vektorn $\vec{x}_{r1}$ istället väljs utifrån det bästa värdet från tidigare generering. Fördelen med att använda ett slumpmässigt sökrum är att ett större sökområde kan utforskas, men på bekostnad av ökat behov av processorkraft.[22] I *Scipy Optimize* ingår en funktion för att genomföra Differential Evoultion. Standardinställningen är mutationsstrategin *best1bin* som representerar DE/best-metoden.

3.3 Monte Carlo simuleringar

Monte Carlo, en metod som har använts inom vetenskapen sedan 1953, är en numerisk metod för att erhålla den statistiska fördelningen av utdata utifrån fördelningen av olika variabler i modellens indata. Input-variablerna i modellen kan vara helt statistiska eller pseudostatistiska. Variabelvärdenas probabilitet illustreras i en fördelningsgraf som uppger vilka möjliga värden en variabel kan anta och sannolikheten för att den uppnår dessa värden.[16] Metoden för att använda Monte Carlo simuleringar användes främst tidigare för att verifiera mindre datortunga modeller. Tack vare förbättrad processorkraft har intresset för metoden ökat.[9] Enskilda experiment genomförs där värden för input-variabler slumpas utifrån deras statistiska sannolikhet. De slumpade värdena implementeras sedan en beräkningsmodell för att generera utdata. Efter att denna procedur upprepats ett antal gånger erhålls en uppskattad fördelning av modellens utdata. Utifrån sekvenser av simuleringar erhålls alltså ett resultat i form av en approximativ sannolikhetsfördelning av de förväntade resultaten.[5]

3.3.1 Inverse transform sampling

För att generera en sekvens av värden som är representativa för variabelns fördelning kan metoden *Inverse Transform Sampling* användas. Metoden innebär att värden för indata erhålls utifrån att en likfromig fördelning av värden mellan 0-1 genereras för att sedan interpoleras med inversen av variabelns täthetsfunktion.[9]

En likformig generering av tal mellan 0-1 innebär att alla värden i spannet har lika stor sannolikhet att genereras. Processen att slumpmässigt ta fram tal mellan 0-1 är deterministisk, men eftersom input-talen som genereras är oberoende av U(0,1) anses dessa värden vara pseudo-random.[9] Att slumpa N variabler utifrån en likfromig fördelning med värdena kan göras i Phyton med hjälp av funktionen *numpy.random.uniform(0,1,N)*.

När en likfromig fördelning av N nummer ha slumpats fram kan dessa användas för att generera värden utifrån inversen av variablernas täthetsfunktioner. Denna invers benämns som variabelns kumulativa täthetsfunktion. Om täthetsfunktionen är $F_X(x)$ och u är ett likfromigt slumpat värde mellan 0-1 är motsvarande variabelvärde för X:

$$F_X^{-1}(u) = x \tag{3.2}$$

Genom att integrera de likformigt slumpartade värdena i (3.2) genereras nya variabelvärden utifrån dess specifika fördelning. Det finns olika metoder för att välja hur många värden som genereras, *N*. Inom mekanik finns standardiserade sannolikhetsavvikelser för att beräkna storleken på *N* där resultatet som genereras är inom ett godkänt konfidensintervall. Om en sådan standardiserad avvikelse inte finns tillgänglig bör ett relativt högt värde för *N* väljas för att undvika att värdena inte är representativa. En Monte-Carlo simulering kan sedan användas för att simulera ett representativt resultat för hur systemet hade kunnat se ut om fler datapunkter hade funnits tillgängliga.

4

Dataanlays

För att visualisera och erhålla större förståelse för hur energianvändningen ser ut i verksamheten presenteras nedan information som sammanställts utifrån en dataserie. Dataserien består av de mätningar som genomförts i samband med laddning av elektrifierade fordon på Skanskas projekt E02 i Slakthusområdet.

4.1 Mätdata

Mätning av laddningssessioner och tillhandahållande av data har genomförts med hjälp av tjänsten Powersite som levereras av underleverantören Eviny. I Powersite samlas data om laddningssystemet i form av bland annat laddningstider, effektuttag och batteristatus på de laddande maskinerna. Under projektets gång aggregeras en allt större datamängd som kan nyttjas vid uppföljning av systemets prestation.

4.1.1 Kvalitén på mätdata

Den dataserie som har använts i detta projekt är en sammanställning av de laddningar av fordon som skett mellan Oktober 2024 till Mars 2025. Det förekommer dock brister i mätningen som leder till att en del laddningssessioner inte inkluderats i studien. Till exempel saknas laddningsdata för en av de elektrifierade maskinerna, lastbilen Liu Gong. Detta eftersom denna maskin laddar på ett särskilt kort som inte täcks av mätningarna. Dessutom har mätningar genomförts på endast den laddning gjorts vid högeffektsuttagen, alltså utesluts de system som tillhandahåller långsammare laddning med lägre effekt på natten från mätserien. På grund av tekniska problem vid datainsamling förekommer även ett visst bortfall av data från en av de tre laddningsstationerna för snabbladdning. Bortfallet av data gör att den faktiska energianvändningen är större än vad sammanställ-

ningen förmedlar. Således bör resultaten tolkas som en konservativ uppskattning av den totala energianvändningen för de elektrifierade fordonen.

4.1.2 Datainnehåll och format

I den dataserie som inhämtas från plattformen *Powersite* tillhandahålls information om olika storheter för de laddande enheterna. Dataserien som sammanställs i denna studie består av en fil i Excel med information om varje laddningssession som skett sedan projektet startade i september 2025. Utifrån sammanställningen går det att utläsa vilket fordon som har laddats, start och sluttid för laddningstillfället, den totala energimängden som överförts, fordonets batteristatus vid påbörjad och avslutad laddning, den medeleffekt som laddningen dragit och vilket uttag som använts. Figur 4.1 visar ett utdrag över hur dataserien ser ut i excel.

Slakthusområdet
Charging Sessions Report
Report (01.10.24 - 31.12.24
Report (03.02.25 - 15:22:36

powersite

Charger ID Tag	Color	AC/DC	Date	Start time	End time	Duration	Energy tra	Max pow	Avg power	SoC start	SoC end	Connecto	Customer RFID	Charging Card	User ID	Customer	Last error	Session ID
HL-2022-0 Volvo EC2		DC	01.10.2024	08:47	09:10	23,05	53,49	147,43	139,24	76	99	Conn. 2	4670581215048216CA	Volvo EC230 (107)	4670581215	6033-9086		13319014
HL-2022-0 Volvo EC2		DC	01.10.2024	08:57	09:56	59,37	128,17	147,81	129,74	40	99	Conn. 1	4670581215049C1CA	Volvo EC230 (106)	4670581215	6033-9086		13319073
HL-2022-0 Volvo L12		DC	01.10.2024	12:53	14:04	71	95,13	136,96	80,39	52	99	Conn. 2	4670581215045C07CA	Volvo L120	4670581215	6033-9086		13320957
HL-2022-0 Volvo EC2		DC	01.10.2024	12:57	13:36	39,13	86,49	141,22	132,61	33	73	Conn. 2	4670581215048216CA	Volvo EC230 (107)	4670581215	6033-9086		13320994
HL-2022-0 Volvo EC2		DC	02.10.2024	08:57	09:16	18,83	40,94	147,4	130,43	81	100	Conn. 2	4670581215049C1CA	Volvo EC230 (106)	4670581215	6033-9086		13326772
HL-2022-0 Volvo EC2		DC	02.10.2024	08:57	09:44	46,9	101,75	137,6	130,17	11	59	Conn. 2	4670581215048216CA	Volvo EC230 (107)	4670581215	6033-9086		13326773
HL-2022-0 Volvo L12		DC	02.10.2024	08:58	09:48	50,33	74,18	126,95	88,43	62	98	Conn. 1	4670581215045C07CA	Volvo L120	4670581215	6033-9086		13326778
HL-2022-0 Volvo EC2		DC	02.10.2024	10:52	11:17	24,93	55,45	147,67	133,44	75	100	Conn. 2	4670581215049C1CA	Volvo EC230 (106)	4670581215	6033-9086		13327559
HL-2022-0 Volvo L12		DC	02.10.2024	10:56	11:56	60,23	72,78	142	72,5	65	99	Conn. 1	4670581215045C07CA	Volvo L120	4670581215	6033-9086		13327594
HL-2022-0 Volvo EC2		DC	02.10.2024	10:59	12:00	61,68	140,64	149,03	136,8	31	93	Conn. 2	4670581215048216CA	Volvo EC230 (107)	4670581215	6033-9086		13327612
HL-2022-0 Volvo EC2		DC	02.10.2024	13:01	13:24	23,53	54,23	147,62	138,26	76	99	Conn. 2	4670581215049C1CA	Volvo EC230 (106)	4670581215	6033-9086		13328836
HL-2022-0 Volvo L12		DC	02.10.2024	13:03	13:38	34,97	46,33	101,79	79,5	72	92	Conn. 1	4670581215045C07CA	Volvo L120	4670581215	6033-9086		13328869
HL-2022-0 Volvo EC2		DC	02.10.2024	13:10	13:17	7,35	16,14	147,48	131,76	93	99	Conn. 2	4670581215048216CA	Volvo EC230 (107)	4670581215	6033-9086		13328939
HL-2022-0 Volvo EC2		DC	03.10.2024	08:30	08:57	26,83	62,44	148,1	139,62	71	99	Conn. 2	4670581215049C1CA	Volvo EC230 (106)	4670581215	6033-9086		13335203
HL-2022-0 Volvo L12		DC	03.10.2024	08:39	09:42	63,02	72,08	131,32	68,63	70	100	Conn. 1	4670581215045C07CA	Volvo L120	4670581215	6033-9086		13335238
HL-2022-0 Volvo EC2		DC	03.10.2024	08:45	09:13	27,65	61,99	148,19	134,52	73	100	Conn. 2	4670581215048216CA	Volvo EC230 (107)	4670581215	6033-9086		13335277
HL-2022-0 Volvo L12		DC	03.10.2024	12:22	13:47	84,5	116,68	135,13	82,85	20	83	Conn. 1	4670581215045C07CA	Volvo L120	4670581215	6033-9086		13337098

Figur 4.1: *Utdrag från ett Excel-ark med information om laddningssessioner.*

4.1.3 Inläsning av data

Sammanställningen av data genomfördes i Python (*Visual Studio Code*) med hjälp av biblioteket *Openpyxl*, som möjliggör import av data från Excel. Informationen extraherades från Powersite-filer genom att öppna Excel-arket och selektivt läsa in efterfrågade värden.

4.2 Sammanställning av data

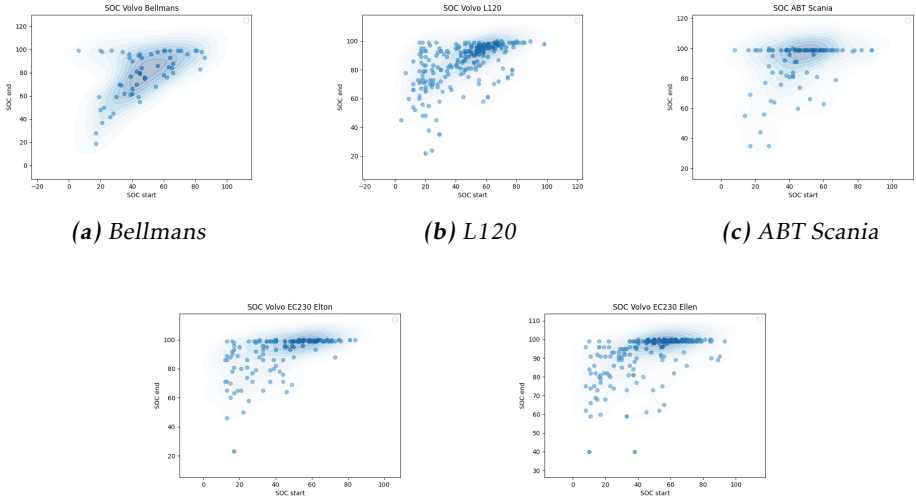
För att sammanställa information i dataserien identifierade de storheter som var av intresse för att kunna dra slutsatser om laddningsrutiner och för att förstå vilken information som fanns tillgänglig som underlag vid modellering av verksamheten. Följande figurer visualiserar den data som ansågs mest betydelsefull för att förstå verksamhetens laddningsmönster.

4.2.1 Laddningsrutiner

För att illustrera laddningsmönster visualiseras nedan information från dataserien. Denna information handlar om laddningstillfällenas starttid, omfattning och om fordonens batteristatus under laddning, vilken kan användas för att erhålla en uppfattning om verksamhetens laddningsrutiner.

Laddningsnivå

För att undersöka rutiner för hur fordonen laddar presenteras i följande fem Figurer 4.2 sambanden mellan laddningsnivå i fordonen vid påbörjad och avslutad laddning.



(a) Bellmans *(b) L120* *(c) ABT Scania*

(d) Elton *(e) Ellen*

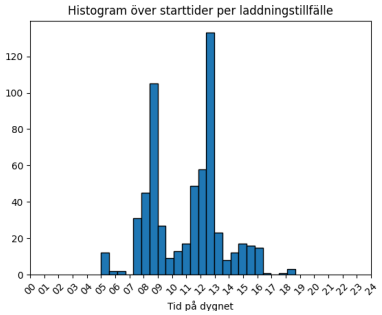
Figur 4.2: *Sambanden mellan laddningens start och slutstatus under de uppmätta laddningssessionerna för samtliga fordon i fordonsflottan. Energinivån i början av laddningen representeras av x-axeln och status vid slutet av laddningen visas på y-axeln.*

Utifrån Figurerna 4.2 går det att se att en stor andel av laddningarna tenderar att genomföras tills batteriet är fullt, oberoende av vad status var vid påbörjad laddningssession. Rutinen för lastbilen Bellmans som visas i Figur 4.2 a) laddas inte upp fullt i lika hög utsträckning som övriga fordon. Dock är antalet datapunkter färre för detta fordon. Det går också att se att fordonen i regel inte laddas ut helt och hållet innan de laddas igen. För samtliga fordon är den genomsnittliga energistatusen i batteriet cirka 50% då laddningen påbörjas.

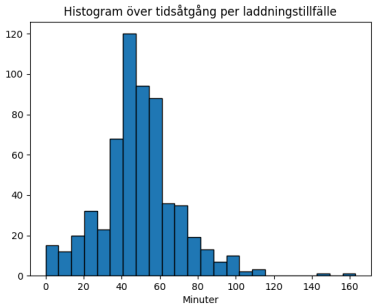
Laddningstider

Histogrammen i Figurerna 4.3 visar spridningen av starttider, samt hur länge varje laddningstillfälle pågått för samtliga mätpunkter i dataserien. Utifrån histogrammet 7.7 a) kan ett mönster utläsas att laddning främst sker under två tidpunkter på dagen. Dessa tider är kring klockan 8.00-9.00 och 12.00-13.00, men en del laddningssessioner påbörjas även vid andra tider på dagen. Utifrån en visuell tolkning av histogrammet i 7.7 b) är spridningen av tidsåtgången per laddningssession ungefär följer en normalfördelning med ett medelvärde på unge-

för 50 minuter. Det faktiska laddningsmönstret av starttider och tidsåtgång per laddningstillfälle skiljer sig något mot den förväntade energianvändningen som presenterats i Tabellen 1.2, där laddning av fordon planeras klockan 9-9.30 och 13-13.30. Alltså används uttagen för snabbladdning i realiteten mer och vid andra tillfällen än förväntat.



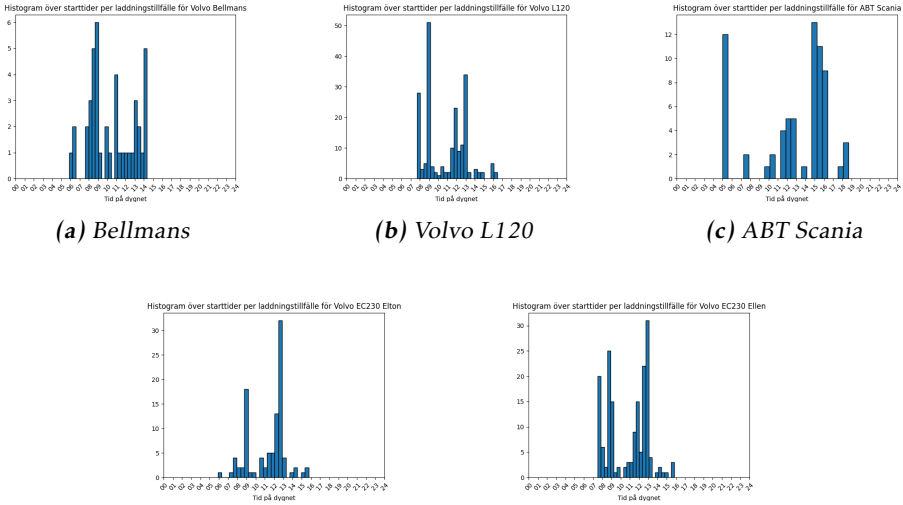
(a) Starttider.



(b) Tidsåtgång per laddningstillfälle.

Figur 4.3: *Histogrammen visar spridningen av variablerna starttid och tidsåtgång per laddningstillfälle. Datapunkterna är hämtade från samtliga loggade laddningstillfällen mellan perioden September 2024 - Mars 2025.*

Den bilden av laddningsrutiner som ges i Figur 4.3 är generell för hela verksamheten, men det förekommer en en viss variation i laddningsmönster för enskilda fordon. Särskilt genomförs laddningen av den elektrifierade lastbilen *Bellmans* på ett annorlunda sätt än för resten av verksamheten. Histogrammen 4.4 visar på hur starttiderna kan skilja sig åt mellan fordonen.



(a) *Bellmans* ***(b)*** *Volvo L120* ***(c)*** *ABT Scania*

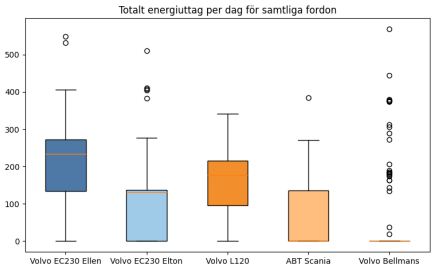
(d) *Elton* ***(e)*** *Ellen*

Figur 4.4: *Histogram över samtliga uppmätta starttider för laddning av de elektrifierade fordonen i fordonsflottan.*

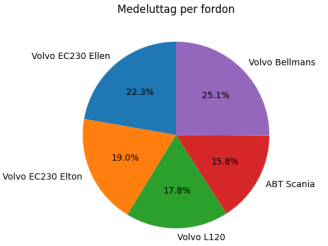
I Histogrammen går det att se att fordonen Volvo L120, Volvo EC230 Elton och Volvo EC230 Ellen följer den generella trenden att de laddas två tillfällen per dag, se 4.4 b),d) och e). De övriga två fordonen Volvo Bellmans och ABT Scania visar inte på en lika tydlig trend. Att laddningsmönster ser olika ut för olika fordon kan bero på att de olika fordonen fyller olika funktioner och att de således laddas på olika sätt. Det kan också vara en konsekvens av att fordonen laddar vid olika stationer och därför har andra rutiner som är oberoende av det generella mönstret för laddning på arbetsplatsen. Vid simulering och analys av laddningsrutiner och energianvändning av olika fordon är det därför viktigt att ta hänsyn till denna faktor.

4.2.2 Energiuttag för enskilda fordon

För att visualisera hur mycket energi som varje enskilt fordon använt plottades spridningen för det totala energiuttaget per arbetsdag i ett låddiagram. I cirkeldiagrammet 7.7 b) går det att utläsa att medelvärdet för det totala energiuttaget per maskin för de dagar då fordonet laddats är relativt jämt fördelat mellan samtliga fordon på arbetsplatsen.



(a) Spridning.



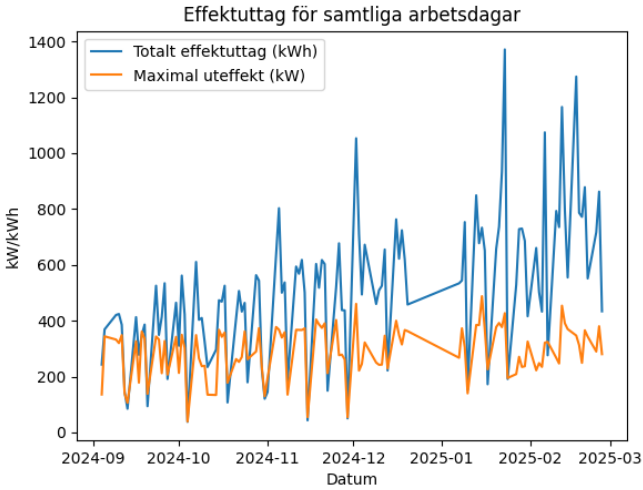
(b) Medeluttag per laddningsdag.

Figur 4.5: *Graferna visar hur stort totalt effektuttag som tagits per fordon per dag. I cirkeldiagrammet presenteras fordonens medelvärde för totalt effektuttag. Medelvärdet är ett genomsnitt för alla dagar då fordonen laddats och noll-värden exkluderats.*

Sammanställningen i histogrammen 4.3 visar att verksamhetens laddningsrutiner för snabbladdning i regel består av två laddningssessioner per dag och dessa sker klockan 8 och 12 på dagen. Laddningssessionerna pågår som oftast i 40-60 minuter, med viss spridning. Starttiden och tidsåtgången för laddningsessionerna korrelerar med arbetarnas raster. Den maskin som laddats mest under projektet E02 är grävmaskinen *Ellen*, se lådan längst till vänster i 4.5. Grävmaskiner drar mycket ström, dels för att de har en central roll på bygget och för att det går åt energi i samband med manövrering av tunga lyft och vridmoment. Det totala energiuttaget från en enskild maskin var som mest 585 kWh per arbetsdag. För ett genomsnitt av varje enskild arbetsdag då fordonen laddats har lastbilen *Bellmans* det högsta totala energiuttaget per dag och lastbilen *ABT Scania* har det lägsta genomsnittliga totala energiuttaget från snabbladdningsstationerna. Datamängden för lastbilen Volvo Bellmans är dock relativt begränsad, då denna maskin introducerades senare på arbetsplatsen. Det genomsnittliga energiuttaget per maskin per dag den är i bruk är relativt jämt fördelat för alla maskiner i cirkeldiagrammet 4.5 b), med en variation från 17-25%. Detta betyder att alla maskiner på arbetsplatsen i snitt nyttjar laddinfrastrukturen lika mycket då de är i bruk.

4.2.3 Totala energiuttag

Grafen 4.6 visar hur totaleffekten och de dagliga maximala momentana effekttopparna för verksamhetens elektriska fordon har varierat under perioden september 2024 till mars 2025.



Figur 4.6: *Det totala effektuttaget, blå linje, är den sammanlagda energimängd som verksamheten totalt använt för att ladda sina fordon. Den orangea grafen visar den högsta effekttoppen för respektive arbetsdag.*

Den totala effekten i Figur 4.6 är alltså den sammanlagda dagliga energimängd i kWh för hela verksamheten. Maxeffekten är den maximala momentana uteffekt i kW som skett under dagen. Grafen visar att verksamhetens totala elanvändning ökade i samband med årsskiftet, men att den maximala uteffekten har varit relativt konstant. Detta beror på att maxeffekten är begränsad av den rådande infrastruktur som finns på arbetsplatsen, vilka är antalet batteripack med en uteffekt på 225 kW vardera. Att den totala energimängd som användes under våren är högre, med en likvärdig infrastruktur, visar att systemet inte utnyttjades lika mycket under perioden September-December. Den infrastruktur som fanns under höstmånaderna hade kapacitet att täcka för energibehovet för en mer energiintensiv verksamhet och var därför något överdimensionerad. En viktig lärdom från denna graf är även att verksamhetsplanerare behöver ta i beaktande hur efterfrågan på elektricitet kan förändras under olika byggskeden och laddningsinfrastrukturen kan behöva anpassas allt eftersom.

5 Modellering

Ett syfte med studien är att ta vara på insamlad mätdata för att generera underlag inför dimensionering och planering av laddinfrastruktur. Detta genomfördes genom att en matematiska optimeringsmodell applicerades på verksamheten. Initialt genererades olika laddningsprofiler utifrån vissa variabler i mätdataserien och sedan integreras denna laddningsprofil i en modell för att optimera laddinfrastrukturen.

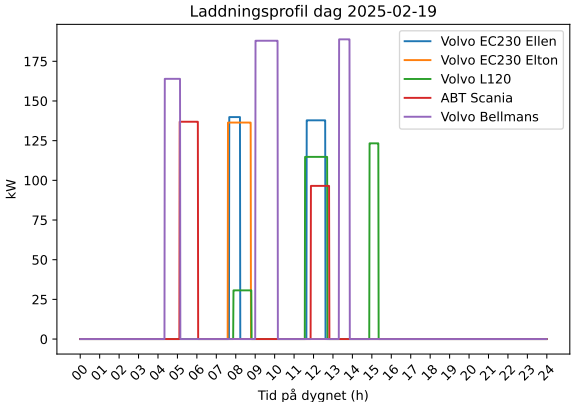
5.1 Modelleringsmiljö

Modelleringen implementerades i programmeringsspråket Python. Python valdes som grund för modelleringen eftersom det är ett väletablerat programmeringsspråk som dessutom tillhandahåller många verktyg och bibliotek som kan användas vid optimering. Visualiseringar av resultaten genomfördes med hjälp av verktyget *Matplotlib*.

5.2 Generering av laddningsprofiler

För att kunna simulera verksamhetens effektuttag i Python och dra slutsatser om nuvarande energianvändning skapades laddningsprofiler för varje arbetsdag. Totalt fanns mätdata tillgänglig från 181 dagar under perioden September 2024 till Mars 2025. För att generera en laddningsprofil för en arbetsdag extraherades information om fyra variabler. Dessa var: Fordonets namn, Laddningstid, Starttid och Medeleffekt. Variablerna integrerades i en vektor på 1440 datapunkter som representerade dygnets alla minuter. Alltså adderades medeleffekten vid indexet som representerade starttiden i minuter och framåt för lika många punkter som laddningen pågick. Detta genomfördes för alla laddningssessioner under dagen

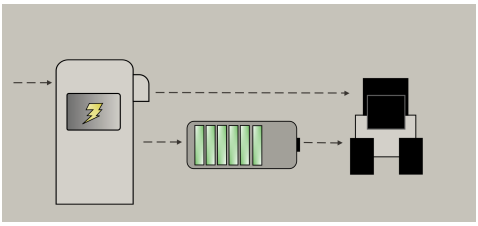
och resulterade i en laddningsprofil. Ett exempel på en laddningsprofil från den 2:a februari illustreras i Figur 5.1.



Figur 5.1: *En sammanställning av laddningssessionerna från den 2:a februari. Y-axeln visar hur högt effekt-uttag som tagits av de olika maskinerna vid olika tillfällen under dagen.*

5.3 Modellbeskrivning och val av målfunktion

En modell skapades för att simulera verksamhetens energiflöden. Figur 5.2 visar hur energi flödar i systemet mellan nätanslutning, stationär batterienhet och fordon.



Figur 5.2: *Ritning över energiflöden vid laddning.*

Den matematiska modell som utvecklades baserades på de energiflöden som illustreras i Figuren 5.2. I arbetet med att utforma modellen identifierades flera nyckelfaktorer som bedömdes vara särskilt viktiga för att kunna modellera laddinfrastrukturen på ett relevant sätt. Dessa faktorer valdes inte bara utifrån deras påverkan på systemets funktion, utan också med hänsyn till modellens praktiska genomförbarhet och tillgången till data. Nyckelfaktorerna som identifierades var nätanslutningens storlek, behovet av energilagring och laddningsrutinernas påverkan på behovet av infrastruktur.

Den första faktorn om nätanslutningens storlek bedömdes vara viktig för att kunna anpassa modellen till nya miljöer med varierande storlek på nätanslutningar. Därför behövde nätanslutningen implementeras som en begränsande faktor i modellen, vilket möjliggör analyser av verksamheter med olika förutsättningar.

Den andra identifierade nyckelfaktorn i modellen var behovet av och storleken på energilagringsenheten. Dimensionering av energilagringens roll i laddinfrastrukturen ansågs vara central då investering i batterier medför höga kostnader. Det beslutades därför att modellen skulle kunna generera något form av resultat för om energilagring behövdes i verksamheten och vilken storlek en sådan enhet i sådant fall behövde vara.

För att besvara den tredje frågeställningen om förändringar i laddningsrutiner kan påverka behovet av laddinfrastruktur behövde det även finnas utrymme i modellen för att hantera dynamiska laddningsprofiler.

Utifrån detta resonemang utvecklades en matematisk optimeringsmodell som använde indata i form av laddningsprofiler och begränsningar för nätanslutningen. En förenkling som gjordes i modellen var att batterienheten och nätanslutningen sågs som en gemensam och central enhet som skulle kunna täcka energibehovet för hela verksamheten. Alltså att det stationära batteriet kunde hantera alla fordonens energibehov och att det laddades inom den effekt som nätanslutningen maximalt var dimensionerad för. Modellens målfunktion var att minimera behovet av energilagring i systemet. Resultatet visar alltså storleken på energilagringsenheten utifrån de begränsningar på nätanslutning och den energianvändning som finns i verksamheten.

5.4 Variabelförteckning

Tabell 5.1 visar en variabelförteckning för de variabler som använts för att sammanfatta modellen.

Variabel	Symbol	Enhet
Nät uteffekt vid tid n	P_{grid_n}	kW
Effektuttag vid tidpunkt n	P_{ut_n}	kW
Maximal effekt nätanslutning	$P_{grid_{max}}$	kW
Maximal energimängd i batteriet	SOE_{max}	kWh
Energimängd i batteriet vid start	SOC_{start}	%
Energimängd i batteri vid tidpunkt n	SOE_n	kWh
Sluttid	N	min
Tidsvektor	$N = [1, 2, 3 \cdots N]$	min

Tabell 5.1: *Variabelförteckning*

5.5 Modellering av batteri

I den matematiska tillämpningen är batteriets status en funktion av tidigare laddning och uttag. Ekvation 5.1 visar förenklat hur energimängden varierar i batteriet, utan att hänsyn tas till eventuella energiförluster.

$$SOE_n = SOE_{n-1} + P_{grid_n} \cdot \Delta t - P_{ut_n} \cdot \Delta \tag{5.1}$$

För att optimera batteriets storlek och samtidigt möta effektbehovet skapades en optimeringsmodell. Målfunktionen som valdes för modellen var att minimera storleken på batterienheten, se 5.2.

$$\min SOE_{max} \tag{5.2}$$

För att utveckla modellen formulerades även begränsningar enligt (5.3). Dessa tar hänsyn till att batteriet inte över- eller underskrider sin kapacitet. För att förlänga batteriets livslängd och vidhålla kvaliteten bör batteriets laddning hela tiden vara inom 20-80 procent. Denna begränsning formuleras i (5.3).

$$SOC_{min} \cdot 0.2 \leq SOE_n \leq SOE_{max} \cdot 0.8 \tag{5.3}$$

Övre och undre gränser sattes på variablerna för effektintaget till batteriet, P_{grid_n}.

$$0 \leq P_{grid_n} \leq P_{grid_{max}} \tag{5.4}$$

Begränsningar för målfunktionen SOE_{max} angavs för att batterienheten skulle anta ett positivt värde enligt 5.5.

$$0 \leq SOE_{max} \leq \infty \tag{5.5}$$

Med hjälp av effektprofilerna som beskrivits i kapitel 5.2 kunde simuleringar som visade kvävd batteristorlek för olika energibehov och kapaciteter för nätanslutningar genomföras.

5.5.1 Slutgiltig modell

Nedan presenteras en sammanfattning av den slutgiltiga modellen som beskrivs i Kapitel 5.5.

$$
\begin{aligned}
\underset{SOE_{max}}{\text{minimize}} \quad & SOE_{max} \\
\text{subject to} \quad & (SOC_{start} - 0.8) \cdot SOE_{max} + \sum_{n=0}^{N} P_{grid_n} \cdot \Delta t \leq \sum_{n=0}^{N} P_{ut_n} \cdot \Delta t \quad , \forall N, \\
& (0.2 - SOC_{start}) \cdot SOE_{max} - \sum_{n=0}^{n} P_{grid_n} \cdot \Delta t \leq - \sum_{n=0}^{N} P_{ut_n} \cdot \Delta t, \forall N, \\
& \sum_{n=0}^{N} P_{grid_n} \cdot \Delta t = \sum_{n=0}^{N} P_{ut_n} \cdot \Delta t \quad , N = N_{fin}, \\
& P_{grid_n}[0, P_{grid_{max}}] \quad , \forall n, \\
& SOE_{max}[0, \infty]
\end{aligned}
$$

Målfunktionen valdes för att minimera storleken på det stationära batteriet. De första två begränsningarna som beskrivs i modellen säkerställer att batteriet håller sig till en laddningsnivå inom 20-80%. I den första begränsningen innebär detta att startnivån på batterienheten plus den ansamlade energin vid uppladdning behöver vara lägre än summan den uttagna effekten och en maximala energinivån i batteriet. Samma princip följer den följande begränsningen. Den tredje begränsningen innebär att energinivån i batteriet under slutet av dagen ska vara på samma nivå som vid dygnets början. Alltså ska laddningen och uteffekten på från batteriet vara lika stor. I de sista två raderna av modellen beskrivs de variabelberänsningar som sattes på P_{grid} och SOE_{max}.

5.5.2 Implementering i Python

Optimeringsmodellen skapades med hjälp av beräkningsverktyg som ingår i biblioteket Scipy Optimize. För att minska behovet av datorkraft och långa kompileringstider begränsades problemet till ett linjärt problem och funktionen *linprog* användes för att lösa problemet.

För målfunktionen c skapades en vektor där alla variabler förutom SOE_{max} nollställdes.

$$
\begin{pmatrix} c = SOE_{max}, & 0, & 0, & 0, \ldots 0 \end{pmatrix} \tag{5.6}
$$

Begränsningarna i Modellen 5.5.1 sammanställdes i matrisform för $A_{ub} \leq b_{ub}$ enligt:

$$
A_{ub_1} = \begin{bmatrix} 0.2 - SOC_{start} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.2 - SOC_{start} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.2 - SOC_{start} & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0.2 - SOC_{start} & \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0.2 - SOC_{start} & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad A_{ub_2} = \begin{bmatrix} SOC_{start} - 0.8 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ SOC_{start} - 0.8 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ SOC_{start} - 0.8 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ SOC_{start} - 0.8 & \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ SOC_{start} - 0.8 & -1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \tag{5.7}
$$

$$b_{ub_1} = \begin{bmatrix} 0 \\ \sum_{n=0}^{0} P_{ut_n} \cdot \Delta t \\ \sum_{n=0}^{1} P_{ut_n} \cdot \Delta t \\ \sum_{n=0}^{2} P_{ut_n} \cdot \Delta t \\ \vdots \\ \sum_{n=0}^{N} P_{ut_n} \cdot \Delta t \end{bmatrix} \quad b_{ub_2} = -b_{ub_1} \tag{5.8}$$

Simuleringar genomfördes för varje arbetsdygn på minutbasis. Alltså utökades antalet variabler till antalet minuter på ett dygn, $N = 1440$. Effektuttaget anpassades till att representera en minuts energiuttag genom att multiplicera effektuttaget med $1 \div 60$.

För att även ta hänsyn till att batteriet inte ska avsluta dygnet med för lågt energiinnehåll integrerades även ett krav på att batteriet vara laddat till startnivå SOC_{start} vid varje dygnsavslut. Alltså skapades en variabelbegränsning att den sammanlagda intagna energin plus det initiala energiinnehållet i batteriet ska motsvara det sammanlagda uttaget och modellerades enligt:

$$A_{fin} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}, \quad b_{fin} = \begin{bmatrix} \sum_{n=0}^{N_{fin}} P_{ut_n} \cdot \Delta t/60 \end{bmatrix} \tag{5.9}$$

$$A_{fin} = b_{fin} \tag{5.10}$$

Variabelbegränsningar sattes för den första variabeln som representerar batteristorleken. Denna begränsning såg till att energiinnehållet i batteriet inte kunde anta ett negativt värde. Ingen övre gräns sattes, eftersom syftet var att minimera batteristorleken.

$$\begin{bmatrix} bat_b = (0, \infty) \end{bmatrix} \tag{5.11}$$

Variabelbegränsningar för att kunna reglera det maximala effektintaget sattes även för samtliga variabler som representerar den intagna effekten till batteriet.

$$\begin{bmatrix} P_{grid_b} = (0, P_{grid_{max}/60}) \cdot N \end{bmatrix} \tag{5.12}$$

Målfunktionen (5.6) och variabelbegränsningarna (5.11) & (5.12) implementerades sedan i lösaren *linprog*.

6

Simuleringsmetoder

I följande kapitel beskrivs de metoder som användes för att applicera optimeringsmodellen som skapats i Kapitel 5. Initialt skapades laddningsprofiler i enlighet med beskrivningen i Kapitel 5.2 utifrån den ursprungliga dataserien. Därefter modellerades nya laddningsprofiler med hjälp av Monte-Carlo-metoden.

6.1 Simuleringar av batteristorlek

Utifrån det kartlagda effektbehovet i Kapitel5.2 simulerades energiflödet mellan nätanslutningen och fordonen för varje arbetsdag. Vid behov av energilagring modellerades även batteriets laddningsstatus och nödvändig kapacitet, baserat på en given laddningsprofil. Batteriets storlek togs fram med stöd av modelleringen i Kapitel 5.2.

I simuleringen varierades två parametrar: $P_{grid_{max}}$, som anger den maximala effekt som kan tas från elnätet för att ladda batteriet, och vektorn P_{ut}, som representerar det totala effektbehovet per minut för hela fordonsflottan. Genom att variera dessa parametrar skapades olika scenarier för energiflödet, vilket i sin tur gav resultat i form av minsta möjliga batterikapacitet som krävdes.

6.1.1 Varierande laddningskapacitet

Parametern för det maximala laddningskapaciteten för batterienheten, alltså effektintaget från nätet, för batteriet varierades stegvis med steg på 50 enheter från 50 till 450 kW. Den övre gränsen valdes eftersom det motsvarade maximala effektuttaget som verksamheten haft, se Figur 4.6. Simuleringar med optimeringsmodellen genomfördes sedan för varje arbetsdag. Resultatet för den minimala batteristorleken med olika laddningskapaciteter som behövs för att täcka energibehovet under alla arbetsdagar sammanställdes i en matris. Utifrån denna matris

kunde fördelningen för behovet av batteristorlekar för olika laddningskapacitet plottas i ett låddiagram. I ett låddiagram illustreras utfallets spridning i form av medianvärde, övre och undre kvartiler samt max- och minvärde.

6.1.2 Variationer i starttid

För att undersöka hur variationer i starttid kan optimeras skapades en modell där starttiden användes som fri variabel för att minska behovet av energilagring. Grundtanken var att se vilka möjliga minskningar i effekttoppar och energilagringsbehov som skulle kunna åstadkommas ifall varje enskild laddningssession kunde flyttas med ett visst intervall.

Laddningsprofiler skapades utifrån orginaldata med starttider, laddningstid och medeleffekt. En variabel s introducerades för att simulera en dynamisk start på laddningstiden. Frihetsgraden, $\mathbf{F}$, för denna variabel introducerades med hjälp av variabelbegränsningar, enligt (6.1). Värdet på F innebar alltså hur många minuter framåt och bakåt modellen hade frihet förflytta starttiden för varje enskilt laddningstillfälle.

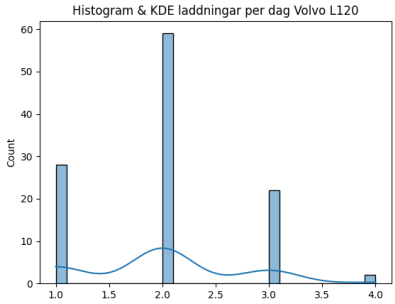
$$s = [-F, +F] \tag{6.1}$$

Optimeringsmetoden *Differential Evolution* med strategin *Best1bin* i *Scipy Optimize* användes för att genomföra optimeringen. Nya värden för minimal batteristorlek genererades stokastiskt utifrån laddningsprofiler med olika starttider. Den optimala laddningsprofilen var den vars starttider skapade de största besparingarna i batteristorlek för verksamheten.

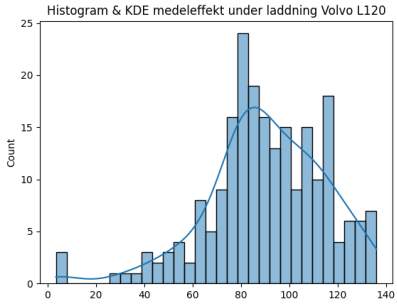
6.2 Monte Carlo simuleringar

För att analysera inverkan för hur systemet påverkas av ett annorlunda laddningsmönster eller att nya fordon tillkommer till arbetsplatsen skapades sannolikhetsprofiler för olika variabler utifrån den insamlade datamängden. Dessa variabler ansamlades för varje enskilt fordon och var: antal laddningssessioner per dag, medeleffekten under laddningen, tid per laddningssession och starttid för laddningen. En simulerad dag med laddning för en fordonsflotta kunde därmed skapas med slumpmässiga värden utifrån variablernas sannolikhetsprofiler.

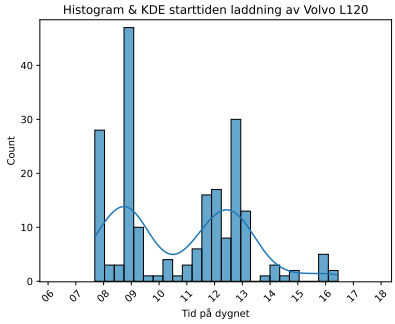
För att erhålla en överblick över fördelning av variablerna plottades grafer med histogram och kärndensitetsuppskattningen. Dessa grafer skapades med hjälp av Python-biblioteket *seaborn*. Exempel för hur fördelningen såg ut för laddningen av Volvo L120 illustreras i figurerna 6.1.



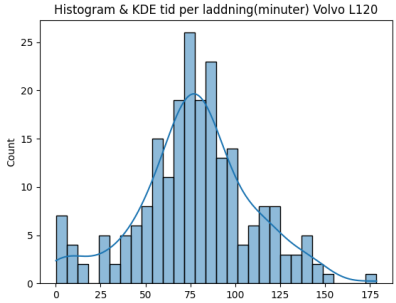
(a) Antal laddningar per arbetsdag.



(b) Medeleffekt per laddning (kW).



(c) Starttider för laddningar.



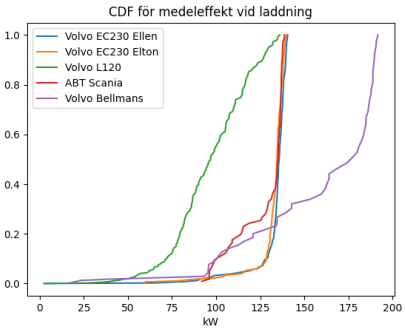
(d) Tidsåtgång per laddning s(minuter).

Figur 6.1: *Histogram och uppskattning av kärndensitet av laddningsrutiner för Volvo L120.*

6.2.1 Direkt sampling

Samplingen av nya variabelvärden utifrån fördelningen från datamängden skedde på två olika sätt. Antingen genom direkt sampling eller genom sampling utifrån en anpassad teoretisk fördelningskurva. Variablerna generades på olika sätt för att kunna möjliggöra analyser utifrån modifiering av särskilda parametrar.

För den direkta samplingen uppskattades sannolikhetstäthetsfunktionen(PDF) utifrån histogrammen, vars integral genererade den kumulativa distributionsfunktionen. Den samplade datamängden för variabeln skapades sedan genom att uniformt slumpmässiga värden mellan 0-100% drogs som sedan interpolerades i variabelns kumulativa täthetsfunktion. Ett exempel för hur den kumulativa täthetsfunktionen ser ut för medeleffekten under laddning för samtliga fordon visualiseras i Figur 6.2.



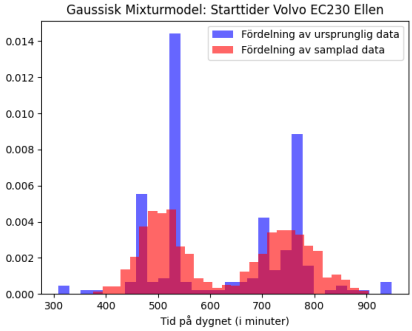
Figur 6.2: *Den kumulativa täthetsfunktionen för medeleffekten under alla laddningssessioner för samtliga fordon i fordonsflottan.*

För att generera den kumulativa täthetsfunktionen sorterades datapunkterna, sedan delades den kumulativa summan för varje punkt med den totala summan av alla variabler. Scipy-verktyget *interpolate* användes sedan för att skapa en CDF för variabeln. För att erhålla ett variabelvärde under simuleringen slumpades ett enhetligt stokastiskt värde mellan 0-1 som integrerades i den inversa CDF:en. Metoden med direkt sampling från den inversa funktionen användes för att simulera variabelvärden för effektuttag och antal laddningar per arbetsdag.

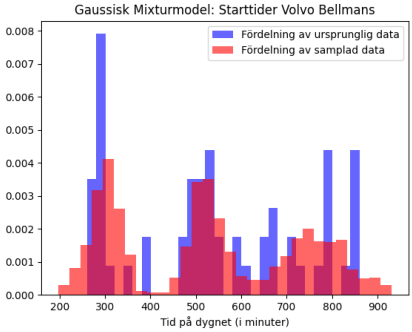
6.2.2 Sampling utifrån fördelning

För att utöka möjligheterna för att kunna genomföra ytterligare analyser anpassades en fördelningskurva till datamängden. Utifrån fördelningen slumpades sedan ett nytt urval av variabelvärden som kunde användas för att simulera laddningssessioner. Syftet med att använda denna typ av metod var att öka flexibiliteten för analyser. Till exempel genom att undersöka vad som skulle hända med utfallet och spridningen för start av laddningstider ökar.

En slutsats som kunde dras utifrån en visuell analys av histogrammet för variabelvärdet Starttider för laddning"var att fordonen i regel laddades i olika kluster, se exempel i Figur 6.1 c). Mönstret för starttider av laddning varierade för olika fordon. En blandning av två eller flera olika normalfördelningar anpassades därför till datamängden för att generera nya variabelvärden. För att skapa en sådan typ av fördelning samplades nya variabelvärden utifrån fördelningar som skapats med hjälp av verktyget *GaussianMixture* som ingår i Python-biblioteket *sklearn*. Figur 6.4 visar ett exempel för hur de två fördelningskurvorna implementerades mot fördelningen av den ursprungliga datamängden för starttider.



Figur 6.3: *Fördelningen för ursprunglig data och de anpassade normalfördelningarna för grävmaskinen Ellen.*



Figur 6.4: *Fördelningen för ursprunglig data och de anpassade normalfördelningarna för dumpern Bellmans.*

Den enda variabeln som genomgående visade på en uniformt normalfördelad spridning var *tidsåtgång per laddningstillfälle*. Istället för att extrahera CDF:en anpassades därför en normalfördelning till datamängden. Utifrån medelvärdet och standardavvikelsen i denna normalfördelning kunde ett nytt urval av variabelvärden skapas med hjälp av funktionen *random.normal* i numpy-biblioteket.

6.2.3 Generering av laddningsprofiler

För varje simulerad arbetsdag drogs först ett stokastiskt värde för antalet laddningar per fordon utifrån det specifika fordonets kumulativa täthetsfunktion för *Antalet laddningar per dag*. För varje laddning genererades sedan en laddningssession genom att variabler drogs för *starttid*, *laddningstid* och *medeleffekt*. Effektuttaget för samtliga fordon i fordonsflottan summerades sedan och skapade därmed en simulering av belastningen på laddningsinfrastrukturen för en representativ arbetsdag. För att erhålla större spridning och säkrare resultat genererades ladd-

ningsprofiler för 200 simulerade arbetsdagar och dessa implementerades sedan i optimeringsmodellen.

6.3 Testade fall

Ett antal olika scenarion testades för att framställa resultaten från modelleringen. Dessa testade fall utgick antingen från orginaldata eller från de simulerade scenariona med hjälp av Monte-Carlo metoden.

6.3.1 Totalt energiuttag för samtliga fordon

För att undersöka hur skillnaden för effektuttaget för olika fordon ser ut undersöktes även effektuttaget för respektive fordon under samtliga fall. Effektbehoven sammanställdes i ett låddiagram.

6.3.2 Variationer i starttider

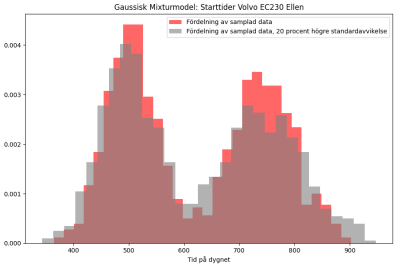
Eftersom verksamheten är bunden till ett schema finns det begränsningar i hur dynamisk laddningarnas starttider kan varieras. För att undersöka vilka besparingar som skulle kunna erhållas om verksamheten laddade annorlunda undersöktes hur förändringar i verksamhetens rutiner skulle kunna leda till besparingar i behov av laddinfrastruktur. I optimeringsmodellen i Kapitel 6.1.2 introducerades därför frihetsgrader för starttiden med 10, 30 och 60 minuter. Optimeringar med dessa frihetsgrader genomfördes sedan för olika nätanslutningar.

6.3.3 Storlek på fordonsflotta

För att undersöka hur förändringar i fordonsflottan påverkar behovet av laddinfrastruktur genomfördes simuleringar med olika fordonsflottor. Fallen som testades valdes ut i samspråk med Skanska. Dessa fall handlade om att undersöka vilken påverkan tillägg av specifika fordon har på systemet. Särskilt intresse fanns för att utreda hur användandet av fler elektriska grävmaskiner skulle påverka behovet av infrastruktur. Det fanns också ett intresse av att se över hur tiderna för laddning av fordon påverkade dimensioneringen av laddinfrastrukturen. Därför undersöktes även hur förändringen av starttiden för de enskilda laddningssessionerna påverkade behovet av batteristorlek.

6.3.4 Ökad spridning av starttider

De genererade värdena av starttiden för fordonens laddningssessioner är uppdelad i flera normalfördelningar. För att generera nya simulerade dagar med andra laddningstider modifierades standardavvikelsen för de olika normalfördelningarna som värdena slumpades utifrån. Tre nya fall testades, då spridningen av starttider ökade med 10, 20 och 30 procent.



Figur 6.5: *Histogram över skillnaden i starttider vid laddning med modifierad standardavvikelse.*

Simuleringar genomfördes även för att undersöka hur dimensioneringen av laddningssystemet påverkas om vissa av fordonen laddades under förmiddagen, istället för vid lunchtid. Till exempel skulle skiften på arbetsplatsen kunna anpassas med raster på andra tider, för att minska köer och belastning på infrastruktur. Därför tidigarelades laddningen vid lunchen för vissa fordon.

7

Resultat och analys

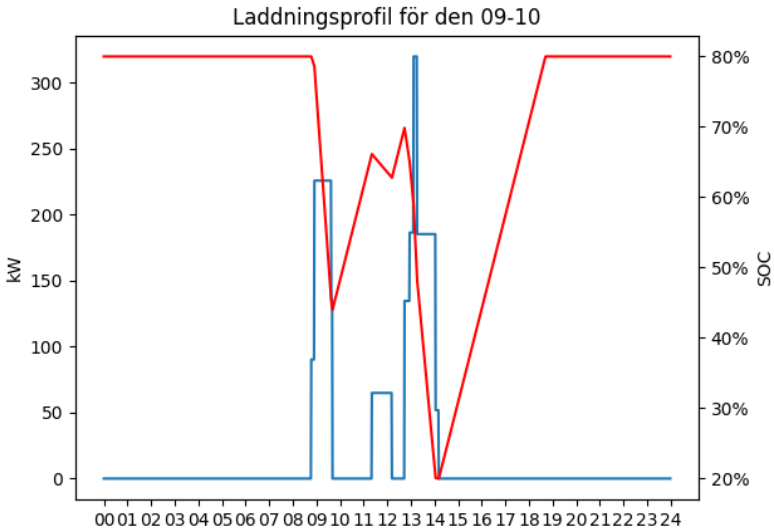
Nedan presenteras och analyseras simuleringsresultaten från den modell som beskrivs i Kapitel 5. Initials illustreras resultaten från de simuleringar som genomfördes från den ursprungliga datamängden och sedan presenteras utfallet från de Monte-Carlo-simulerade värdena.

Tolkning av låddiagram

För att erhålla en överblick över skillnader i spridning av resultaten mellan olika nätanslutningar presenterades resultaten i låddiagram. I ett låddiagram visar den orangea linjen medianen från resultatet från samtliga simulerade dagar. Lådornas lägre och övre kant representerar den 25:e respektive den 75:e kvartilen i datasetet. Värden som ligger mer än tre gånger kvartilavståndet från lådan betraktas som extremvärden och illustreras med en vit prick.

7.1 Laddningsprofil

I Figuren 7.1 visas ett exempel hur modellen simulerat energiflödet mellan nätanslutning, batteri och fordon. Det specifika scenariot för denna laddningsprofil är tagen från en 10:e september då den tillåtna laddningen från nätanslutningen angivits som maximalt 50 kW.



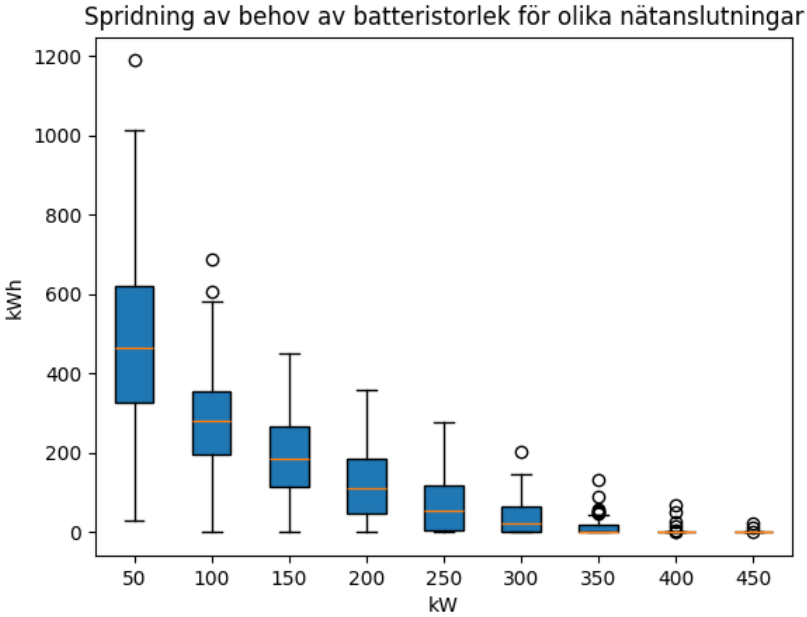
Figur 7.1: *Laddningsprofil för verksamhetens effektuttag och batteristatus den 10:e september. X-axeln visar dygnets alla timmar. Den röda linjen, med värden från högra y-axeln, visar batteriets laddningsstatus (SOC - State of Charge). Den blå linjen, med värden på den vänstra y-axeln, visar de effektuttag som fordonen har tagit under arbetsdagen.*

Laddningsprofilen för samtliga simuleringar modelleras på minutnivå utifrån den data som tillhandahållits från Evinys mätningar i *Powersite* eller från de simulerade laddningsprofilerna från Monte-Carlo-simuleringarna. I Figur 7.1 visualiseras batteriets status utifrån ett det effektuttag som skedde den 10:e oktober 2024. Batteriet laddas ur när fordonen laddar vid klockan 8 och laddar sedan upp igen fram tills nästa uttag vid klockan 11.00. Det högsta effektuttaget (maxeffekten) på 300 kW sker vid klockan 13.00. I samband med denna laddning laddas batteriet ur till 20% av sin maxkapacitet. I simuleringen för exemplet 7.1 kan batteriet laddas upp med 50 kW från nätet. Hade batteriet haft mer tid för återuppladdning eller högre laddningshastighet mellan första och andra laddningstillfällena hade dess storlek kunnat minskas. En förutsättning är att den sammanlagda energin från nätanslutningen och den momentana energimängden i batterienheten ska vara tillräckligt stor för att täcka effekttopparna. Det behöver

också finnas tillräckligt med tid för batteriet att ladda upp innan nästa arbetsdag, något som dock inte är ett problem i detta exempel. De faktorer som begränsar verksamhetens behov av energilagring enligt modellen är alltså en kombination av storlek på batterienheten och nätanslutningen, alltså vilken hastigheten som batteriet kan laddas upp igen.

7.1.1 Optimal batteristorlek med olika nätanslutningar

För att undersöka behovet av energilagring för olika laddningskapaciteter mellan 50-450 kW i batterienheterna genomfördes optimeringar i modellen i Kapitel 5.5 för samtliga arbetsdagar. Resultatet i Figur 7.2 visar spridningen av behovet av dimensionering av lagringsenheten under alla arbetsdagar i datamängden. Då nätanslutningen är mindre krävs i regel ett större batteri och variationen av behovet är högre för olika arbetsdagar. En aspekt som kan lyftas utifrån Figuren 7.2 är att det enligt simuleringsresultaten inte finns något behov av energilagring för en stor majoritet av dagarna vid de högre nätanslutningarna. Vid en 450 kW anslutning kan, med undantag för ett fåtal extrempunkter, effektbehovet tillgodoses för i princip alla arbetsdagar. Som en följd av det minskande behovet av stationär energilagring vid ökande nätanslutningar bör därför en avvägning mellan kostnader för högre nätanslutningar och investering i batterienheter genomföras. Det bör även övervägas om laddinfrastrukturen ska dimensioneras utifrån extremvärden, då energibehovet i verksamheten är som störst, eller om det finns en möjlighet att anpassa verksamhetens laddningsrutiner under dessa arbetsdagar och därmed undvika behovet av installera stationära energilagringssystem över huvud taget.

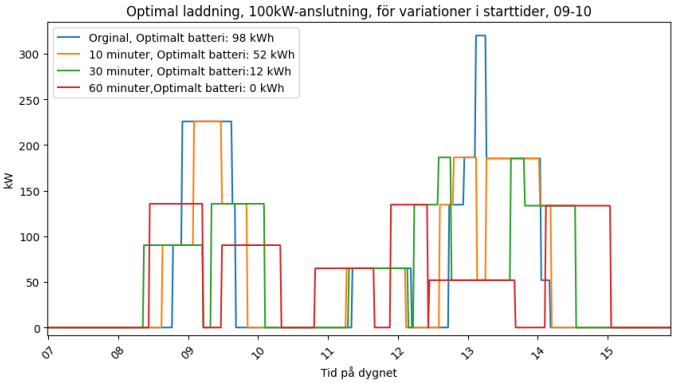


Figur 7.2: *Spridning av resultatet för behovet av energilagring för samtliga arbetsdagar vid olika storlek på nätanslutningar. Y-axeln visar lagringsenhetens energimängd i kWh och x-axeln illustrerar olika uppladdningskapaciteter i kW.*

I Figur 7.2 går det att se att batterienheten behöver vara större ju mindre nätanslutningen är. När nätanslutningen är 400 - 450 kW behövs inte någon energilagringsenhet, med undantag för några extremvärden. Spridningen av behovet av energilagringsenhet för 75% av alla värden i mitten är ungefär lika stor för nätanslutningar mellan 100-250 kW och behovet av energilagring ökar relativt linjärt. Då nätanslutningen är 50 kW är spridningen betydligt större. Detta kan bero på att när nätanslutningen är låg behöver energilagringsenheten täcka för verksamhetens hela energiuttag. Således behöver den storlek på nätanslutningen där återuppladdningskapaciteten är tillräckligt hög för att möta effekttopparna identifieras.

7.2 Optimering av starttider

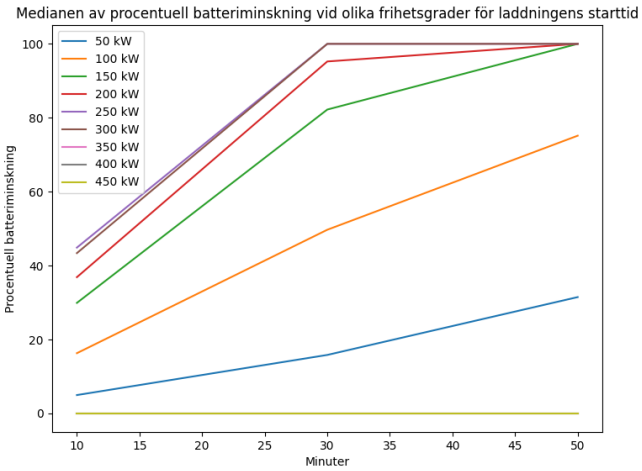
Då modellen tillåts ändra starttiden för enskilda laddningstillfällen med 10-60 minuter kan behovet av batteristorlek minskas. I Figur 7.3 visas en exempeldag för hur det optimala effektuttaget ser olika ut beroende på vilken frihet modellen ges för att ändra på laddningstillfällenas starttid.



Figur 7.3: *Exempel på hur en enskild laddningsprofil för den 10:e september förändras när optimeringsmodellen ges olika friheter i att variera starttider för varje laddningstillfälle och energilagringsenheten har en kapacitet att ladda med 100kW.*

I Figuren 7.3 går det att se att effekttoppen vid 13-tiden försvinner när laddningssessionerna kan ändra starttid. Detta gör att batteriets storlek kan minskas med 50% redan vid en 10 minuters fram eller bakåtförskjutning av enskilda laddningssessioners starttid för detta specifika fall. Då modellen tillåts variera starttiderna med en timme är effektuttagen så pass låga och långt ifrån varandra att ett 100 kW-uttag kan möta verksamhetens behov utan någon form av energilagring för denna specifika arbetsdag. I Figuren 7.3 går det att se att spridningen av starten för laddningssessionerna är som störst för det fall då modellen får som mest frihetsgrad att förflytta dem. Optimum finns alltså där spridningen av laddningstiderna är som störst. Detta beror på att effekttoppas undviks när ingen av sessionerna överlappar och att det finns utrymme för batteriet att ladda upp igen efter att laddningen har genomförts.

I figur 7.4 visas medianvärdet för den procentuella minskningen i behov av energilagring för olika nätanslutningar när modellen ges olika utrymme att förändra startpunkten för enskilda laddningssessioner. Det går att utläsa att behovet av energilagring minskar när starttiderna kan förändras, och att denna minskas redan vid en förändring av starttid på ±10 minuter. Grafen visar även att medianen av den procentuella minskningen i behov av storlek på energilagringsenheten ökar när storleken på nätanslutningen gör det. För nätanslutningar som är 250 kW och högre kan behovet av energilagring försvinna helt för över hälften av datapunkterna om starttiderna ges en frihet att ändras med ±30 minuter. Om modellen ges frihet att förändra starttiden med ±60 minuter försvinner behovet av energilagring för över hälften av arbetsdagarna även för nätanslutningar från 150 kW och uppåt. Eftersom över hälften av värdena vid laddning med en 450 kW-nätanslutning hade möjlighet att täcka verksamhetens energibehov är den procentuella minskning av energilagringsenheten 0 för 450 kW-uttaget.



Figur 7.4: *Medianen för samtliga arbetsdagar för den procentuella minskningen i batteribehov då laddningstillfällenas starttid optimeras med en frihetsgrad på 10-60 minuter.*

Att förändra starttiden för laddningssessionerna är alltså ett effektivt sätt att minska behovet av kostsam laddinfrastruktur, trots att effektuttaget och laddningstiden är densamma. Implementering av denna typ av laddning i verkligheten är dock på bekostnad av de befintliga rutiner som verksamheten har idag. De nuvarande laddningssessionerna är anpassade efter arbetarnas raster och om fordonen skulle laddas annorlunda behöver dessa raster anpassas. Att alla arbetare inte har rast samtidigt kan påverka delar av arbetsmomenten och ta bort viktiga tillfällen för diskussion som förbättrar samarbetet och sammanhållningen på arbetsplatsen. Idag laddar varje fordon i snitt i 40-60 minuter. Om laddningssessionerna kan anpassas med tio minuters framåt eller bakåtförskjutning kan det göra att infrastrukturen är mer robust för att möta ökande energibehov. Det skulle därför vara förmånligt att undersöka möjligheterna om laddningssessionerna kan förlängas eller överlappas. Till exempel skulle vissa arbetares raster kunna förskjutas eller att fordon laddas på timer i olika intervall för att minska effekttoppar och ge batterienheten tid att ladda upp igen.

7.3 Utfall från Monte-Carlo simuleringar

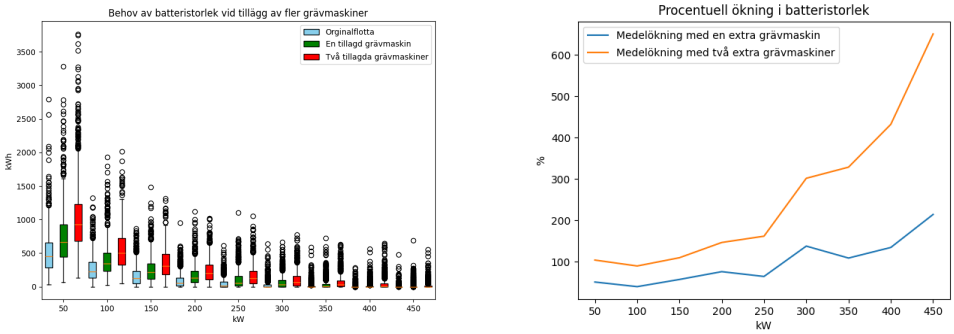
Nedan presenteras resultaten från Monte-Carlo studien. Alltså är variablerna för laddsessionerna simulerade utifrån samplingsmetoden *Inverse Transform Sampling*. Det är ett representativt resultat för hur laddningsrutiner skulle se ut om fordonen följer nuvarande trender.

7.3.1 Tillägg av maskiner

I detta kapitel presenteras grafer över hur omfattningen av laddningsinfrastruktur behöver förändras när fordonsflottan ökar i storlek.

Tillägg av grävmaskiner

Tre simuleringar genomfördes då antalet grävmaskiner av modellen *Ellen* utökades. Figur 7.5 a) visar att behovet av energilagring ökar när ytterligare en grävmaskin adderas till modellen. För ordinarie fordonsflotta kan energibehovet mötas för över 75% av arbetsdagarna vid en effektanslutning på 350-400 kW. Vid tillägg av en grävmaskin är motsvarande värde 400-450 kW. Figuren visar även att spridningen av behovet av batteristorlekar är större för samma nätanslutning med en större fordonsflotta. Figur 7.5 b) visar att medelvärdet för ökningen av energilagringssystem är högre för större nätanslutningar.



(a) Spridning av resultat (b) Medelökning av energilagringsbehov.

Figur 7.5: *Behovet av energilagring med olika storlek på nätanslutning för en fordonsflotta med fler grävmaskiner av modellen Ellen.*

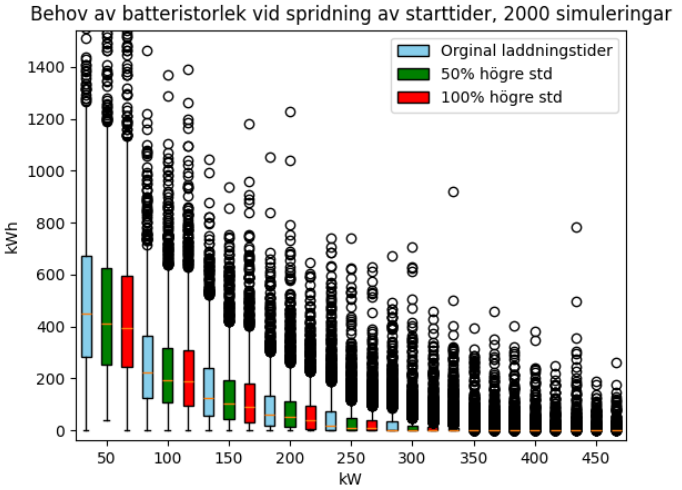
Då antalet maskiner i verksamheten ökar, ökar behovet av energilagring relativt linjärt. För scenarion där en nätanslutning mellan 50-250 kW går det att i Figuren 7.5 b) utläsa att medelökningen av behov av energilagringsenhet är relativt konstant vid tillägg av en ny grävmaskin. Grafen visar den procentuella skillnaden av medelvärdet från verksamhetens originalflotta för alla värden i Figur 7.5 a). För högre nätanslutningar är kurvans lutning brantare, särskilt när två grävmaskiner lagts till på platsen. Vid högre nätanslutningar är behovet av energilagring lägre, men den relativa ökningen är alltså högre då fler grävmaskiner läggs till på arbetsplatsen. Detta kan innebära att tillägg av en grävmaskiner gör att dimensionerna för laddinfrastrukturen behöver öka markant. En avvägning bör genomföras mellan den ekonomiska och ekologiska nyttan i ett sådant fall.

I Figur 7.5 a) illustreras det att ju fler fordon som adderas till arbetsplatsen desto större variationer finns det i behovet av laddinfrastruktur för olika arbetsdagar, se att den röda lådans omfång är större än den blå som representerar den

ursprungliga fordonsflottan. Alltså kommer en underdimensionerad laddinfrastruktur för en viss procent av arbetsdagarna leda till fler dagar då systemet inte kan tillhandahålla den energi som krävs.

7.3.2 Spridning i variationer av starttid

För att öka spridningen för starttider vid sampling modifierades standardavvikelsen för fördelningarna av de identifierade klustren vid morgon och lunchtid. Figur 7.6 visar hur resultatet för simuleringarna varierar vid förändring av standardavvikelse. Vid en högre standardavvikelse, alltså en uniformt större spridning på starttider, kan behovet av batteristorlek minskas något.



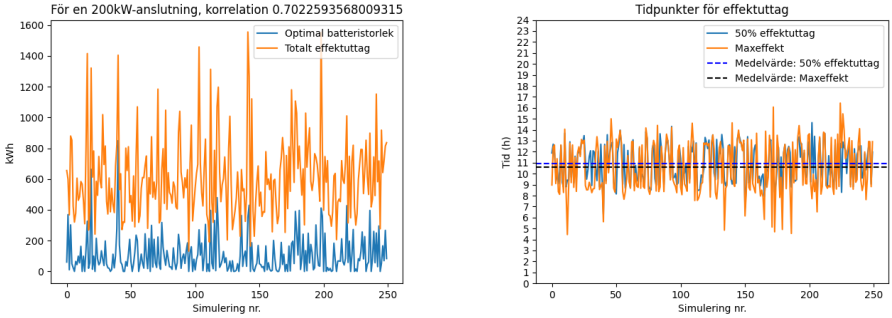
Figur 7.6: *Denna graf visar modellens resultat för behov av energilagring från Monte-Carlo simuleringar där starttider slumpas med en större spridning.*

I figuren kan minskningen av energilagringsbehovet härledas till samma resonemang som diskuterats i kapitel 7.2. Alltså att när starttiderna sprids ut kan effekttoppar försvinna och batteriet får mer tid på sig att ladda upp mellan effektuttagen. Skillnaden på denna simulering och simuleringen i Figuren 7.4 är att i detta fall är spridningen av laddningstillfällena stokastisk. Alltså tas ingen hänsyn till om höga effektuttag tas efter varandra eller sprids ut ojämnt. Optimeringsmodellen i 7.2 sprider ut de enskilda laddningssessionerna för att minimera batteribehovet, men i detta fall är karaktären för laddningen oberoende av spridningen. Det innebär att energilagringsbehovet som estimeras i kapitlet för optimeringsmodellen av starttider kommer att vara lägre än i denna modellering där spridningen av starttider ökats. I ett verkligt scenario kan det vara svårt att manövrera en optimal spridning av laddningens starttider, eftersom det kräver

kompetens och planering av laddningsbehovet på detaljnivå. De logistiska svårigheterna gör att om en verksamhet väjer att sprida ut laddningstillfällena är det mer rimligt att denna spridning sker stokastiskt. För en stokastisk spridning av starttider kan behovet av energilagring minska enligt Figur 7.6, men denna minskning är inte lika stor som när förändringen i starttider optimeras utifrån karaktären av varje enskilt laddningstillfälle.

7.3.3 Maxeffekt och tider för laddning

Figuren 7.7 a) visar hur totaleffekten och behovet av energilagring för ett 200 kW uttag när 200 simuleringar genomförs med hjälp av Monte-Carlo metoden. Korrelationen mellan totalt effektuttag och optimal batteristorlek är 0.7 för dessa 200 simuleringar med en 200 kW-anslutning. Det finns alltså ett starkt samband mellan effektuttag och optimal batteristorlek. Figuren 7.7 b) visar tidpunkter för när dagens maxeffekt uppnås och när hälften av arbetsdagens totala effektuttag genomförts. Grafen visar att 50 procent av verksamhetens totala energimängd i genomsnitt tagits ut före klockan 11 på dagen och att maxeffekten i genomsnitt tas ut på förmiddagen.



(a) Exempel 200 kW-anslutning. (b) Tidpunkter för simulerade värden.

Figur 7.7: *Totalt energiuttag per simulerad arbetsdag, maximal effekt per simulerad arbetsdag och tidpunkter för dem maximala effekten och hälften av uttagen energimängd för 200 Monte-Carlo-simuleringar med en 200 kW nätanslutning.*

Enligt fördelningen i Figur 4.3 a) sker laddningstillfällena på arbetsplatsen framförallt under två tillfällen under arbetsdagen. Dessa tider är mellan 7.30-9.00 och mellan 11.30-13.00. Att maxeffekten i genomsnitt tas klockan 10.40 visar på att se större effektuttagen tenderar att tas under den andra laddningssessionen. I Figuren 7.7 b) sker även medeltiden för samtliga simuleringar då hälften av energimängden tagits vid klockan 11.00, vilket också är närmare det andra laddningstillfället i tid. Detta betyder att påfrestningarna på laddningsinfrastrukturen mellan 11.30-13.00 är högre än under det laddningstillfälle som skett mellan 7.30-9.00. Anledningen till varför en sådan fördelning skett är an-

tagligen för att en del av fordonen långsamladdats under natten. Denna långsamladdning sker utanför mätningar i dataserien. Det kan också indikera på att arbetsmomenten under förmiddagen är tyngre än de som sker på eftermiddagen och att fler fordon därför har lägre batterinivå än under morgonsessionerna.

8

Metoddiskussion

Syftet med denna studie var att utveckla en simuleringsmetod som kan användas som analytiskt verktyg vid dimensionering av laddinfrastruktur för eldrivna maskiner på byggarbetsplatser. Resultaten från simuleringarna visar att flera faktorer påverkar verksamhetens laddningsprofil och därmed även behovet av stationära energilagringssystem. De faktorer som undersökts är nätanslutningens kapacitet, förändring av starttider för enskilda laddningssessioner och tillägg av nya maskiner på arbetsplatsen. I diskussionen tolkas resultatet och dess relevans. Vidare diskuteras även simuleringsmodellens utformning, framtida applikationsmöjligheter och hur Monte-Carlo-simuleringar använts som analytiskt verktyg.

8.1 Monte-Carlo-simuleringar

Monte-Carlo-simuleringar har använts för att modellera nya maskiners laddningsrutiner och effekten från modifieringar av dessa rutiner. Denna modellering har genomförts genom att slumpmässiga värden av variablerna starttid, laddningstid, medeleffekt och antalet laddningar per dag utifrån den specifika variabelns fördelning i den ursprungliga dataserien. Variablerna sätts ihop till en representativ bild av det verkliga scenariot. Denna bild kan vara representativ, men en viktig aspekt vid genomförande av Monte-Carlo-simuleringar är att vara kritisk mot resultatet då en begränsning med metoden är att resultatens relevans är beroende av kvaliteten på in-data.

Metoden Monte-Carlo är fördelaktig att använda då slumpmässiga variabler samverkar, vilket gör det särskilt användbart i detta scenario. Tack vare att simuleringarna av dataserien är mer dynamisk, till skillnad från med statisk data, finns större friheter i att undersöka alternativa fall. Exempel på sådana fall som har undersökts i denna studie är: tillägg av nya maskiner och förändrade rutiner för starttider. Ytterligare fall som hade kunnat undersökas är att genom

modifieringar av respektive variabels täthetsfunktion, vilka effekter ökad tid för laddning med sänkt medeleffekt hade haft på systemet. Detta scenario uteslöts dock från studien då det ansågs vara ofördelaktigt att förlänga laddningstiderna för att det riskerade att sänka byggprojektets produktivitet. Metoden att använda Monte-Carlo-simuleringar har alltså möjliggjort att slutsatser har kunnat dragits utifrån de simulerade förändringarna i den statiska dataserien.

En fördel med Monte-Carlo-simuleringar är att det är lätt att anpassa metoden till andra verksamheter. Genom att integrera fördelningen av variablerna för respektive fordon i en annan verksamhet kan likvärdiga simuleringsmetoder användas för att dimensionera laddningsinfrastrukturen. Tack vare att *Powersite* använder likvärdig struktur och mätningsmetoder för andra projekt med infrastruktur för laddning av konstruktionskostnad är även datainhämtningen skalbar och anpassningsbar. För att vidga resultatet ytterligare och göra dem mer generaliserade hade det därför varit fördelaktigt att samla information från en större mängd projekt.

En faktor som påverkar resultatets validitet är att denna studie baserats på insamlad data från ett specifikt projekt där det redan finns en etablerad infrastruktur. Detta gör att det finns en risk att den inte går att dra generella slutsatser från resultatet. I andra verksamheter kan till exempel fordonen laddas på annorlunda sätt eller ha en annan kapacitet. Dessutom begränsas laddningssessionerna som finns i dataserien av den nuvarande laddningsinfrastruktur som finns på arbetsplatsen idag. Alltså baseras studien på information om vilken belastning som finns i systemet utifrån hur maskinerna har laddat med hjälp av nuvarande infrastruktur. Det finns en risk att det finns brister i den rådande infrastrukturen vilket har påverkat laddningsrutiner och att efterfrågan på ström och laddningsrutiner hade varit annorlunda om tillgången hade sett annorlunda ut. Detta påverkar fördelningen av variablerna som Monte-Carlo-simuleringarna utgår från. Ett alternativt sätt att modellera indata är att utgå från ett uppskattat behov, och inte från tidigare laddningsmönster. Detta behov skulle kunna modelleras genom att uppskatta energianvändningen för enskilda fordon utifrån dess maskintimmar och sedan modellera hur batteristatusen för dessa fordon ser ut under arbetsdagen. Nackdelen med denna metod är dock att den inte baseras på realdata. Att använda en uppmätt dataserie som komplement är därför fördelaktigt för att följa upp om den uppskattade dimensioneringen överensstämmer med utfallet.

En annan viktig aspekt som kan påverka resultatet vid Monte-Carlo-simuleringar är risken att variablerna som simuleras har en stark korrelation. I denna studie behandlas varje variabel som oberoende, vilket inte alltid är fallet. För att undvika detta behöver korrelationer mellan variabler undersökas. Om korrelationen är stor kan sammanlänkade sannolikhetsfördelningar skapas. I denna studie fanns korrelationer mellan variabler. Till exempel förekom starka samband mellan tid för laddning och medeleffekt. Men då dessa korrelationers omfattning var specifika för olika fordon och variabler avgränsades studien till att anta att alla variabler var oberoende av varandra. Implementerande av sammanlänkade sannolikhetsfördelningar skulle kunna stärka studiens resultat ytterligare.

Utifrån dessa resonemang kan en slutsats dras att Monte-Carlo-simuleringar

är en lämplig metod för att möjliggöra mer dynamiska analyser av en statisk datamängd från laddningssessioner av elektroniska konstruktionsmaskiner. Dessa analyser kan göras på många olika sätt och vilka scenarion som studeras behöver anpassas till studiens syfte. För att generalisera studien kan en större datamängd från flera verksamheter inhämtas. Det är dock viktigt att vara kritisk mot resultatet då det är starkt beroende av kvalité på in-data. För att stärka resultatet kan nuvarande metoder kompletteras med data som modelleras utifrån andra principer, det kan även vara fördelaktigt att genomföra mer ambitiösa modelleringar av variablernas fördelningar genom att även ta hänsyn till korrelationer mellan variabler. På detta vis kan mer tillförlitliga och representativa simuleringar uppnås, vilket i sin tur stärker modellens relevans för framtida beslut om dimensionering av laddinfrastruktur.

8.2 Modellering

Modelleringen av laddinfrastrukturen genomförs utifrån laddningsprofiler som integreras i en optimeringsmodell för att minimera behovet av energilagring. Det är alltså en modell av ett utbyte mellan nätanslutning och fordon där energilagringen fungerar som en buffert som kan återhämta sig över tid. Den modell som utvecklats genererar en uppskattning av differensen mellan behov och uppladdningsförmåga utifrån tillåten maxkapacitet på nätet, vilket ger en uppskattning av behovet av energilagring. I modellen ses lagringsenheten som en central enhet och laddningseffekten till fordonen en konstant som baseras på tidigare mätdata. Nedan diskuteras modellens alternativa utvecklingsmöjligheter, validitet och möjliga tillämpningar.

8.2.1 Alternativa modelleringsmetoder

Det finns många aspekter som den modell som utvecklats i denna studie inte tar hänsyn till och som hade kunnat utvecklas för att skapa en ännu mer representativ bild av ett verkligt scenario. Dessutom finns det även helt andra sätt och perspektiv som modelleringen kan utgå från. Modellen är således en grund och ett exempel som både kan vidareutvecklas och anpassas med hjälp av helt andra metoder. Olika typer av begränsningar och variabeluppsättningar kan leda till andra typer av resultat. Att utforska sådana alternativ är centralt för att bidra med analyser från olika perspektiv och skapa bättre uppföljning- och planeringsunderlag. I detta kapitel diskuteras några exempel för hur modellen kan vidareutvecklas och hur andra modelleringsalternativ skulle kunna utvecklas.

Modellering av flerkomponentsystem för laddning

Ett syfte med denna studie var att utveckla en modell som ger underlag vid dimensionering av laddinfrastruktur utifrån de specifika förutsättningar som finns. Modellen som skapats genererar underlag för omfattningen av behovet av energilagring, men det saknas möjlighet att simulera mer modelära verksamheter där flera olika stationära energilagringsenheter, nätanslutningar och tillgängligheten

för olika fordon modellerats. På projektområdet E02 vid slakthusområdet som denna studie utgår ifrån finns idag två olika stationära batterienheter och laddstationer där möjlighet finns för höga effektuttag, som beskrivs i kapitel 1.1.1. För att utveckla modellen ytterligare hade det därför varit värdefullt att modellera mer komplexa system. Ett alternativt sätt att utveckla modellen är till exempel att använda antalet tillgängliga laddstolpar som en begränsande faktor. Genom att allokera fordon till laddstolpar kopplade till olika energilagringsenheter eller direkta nätanslutningar kan en sådan typ av modell bidra till mer detaljerad planering.

Batteristatus som variabel

En brist i denna studie är att fordonens laddningsstatus inte tas hänsyn till. En förändring i starttid av laddningssessionerna kanske inte är möjlig om fordonens batterinivå blir för låg. Ett annat angreppssätt är alltså att utveckla en laddningsprofil som utgår från fordonens batterinivå som indikator för när laddning ska ske och hur omfattande denna laddning behöver vara. Laddinfrastrukturen kan sedan optimeras utefter denna energiprofil. Idag varierar energinivån vid laddningsstart mellan fordonen, vilket påverkar hur och när laddning bör planeras. För att modellera detta hade en sannolikhetsmodell kunnat användas, men den kräver omfattande antaganden eftersom kontinuerlig data om batteristatus saknas. Det finns därmed en risk att en sådan modell inte fullt ut speglar verkligheten.

Optimeringsmodell med fokus på ekonomiska vinster

Den modell som använts i denna studie är linjär och skulle även kunna användas utan en optimeringsmodell. Detta genom att skapa en funktion där effektuttaget minut för minut subtraheras och batteriet laddas upp i enlighet med storleken på in-effekten, och den minimala nivån funktionen antar visar behovet av batteristorlek. Valet att trots detta utforma modellen som en optimeringsmodell var för att skapa utrymme för att senare kunna ta in andra aspekter i analysen. Denna modell kan till exempel utvecklas för att simulera *Time Shifting* genom att lägga in en kostnadsvektor i målfunktionen för att generera inkomster från elmarknaden. Att använda *Time Shifting* är förmånligt för att det skulle kunna öka lönsamheten vid investering i den kostsamma batterienheten. För att i ett sådant fall inte begränsa verksamheten är det viktigt att modellen också säkerställer att energi finns tillgänglig i batteriet då fordonen efterfrågar den, dessutom medför ökad användning av batteriet en snabbare degradering av enheten. På grund av ökade administrativa belastningar och en osäkerhet förekommer generella hinder mot att använda *Time Shifting* i byggbranschen, men dessa hinder skulle kunna överskridas med hjälp av analyser med kostnadsfördelar för användandet av *Time Shifting*. Modellen som presenterats i denna rapport kan alltså användas som grund för att genomföra sådana analyser.

Verkningsgrader och energiförluster

En annan aspekt av batterianvändning som modellen inte tar hänsyn till, men som kan implementeras, är verkningsgrader och energiförluster i systemet. Energiförluster sker både i batteriet under drift, vid transformation från växelström till likström och vid transaktionen från stationärt batteri till fordon. Hur stora förlusterna är kan variera beroende på till exempel temperatur och på hur mycket batteriet degraderat. Förlusterna behöver därför uppskattas och kan sedan implementeras i den linjära optimeringsmodellen i form av konstanter som ökar uteffekten och minskar in-effekten till batterienheten. Om energiförluster skulle tas hänsyn till i modellen hade behovet av energilagring blivit större.

Uteffekt som variabel

För att utveckla komplexiteten utifrån den nuvarande modellstrukturen skulle laddningssessionerna kunna bestå av variabler som kan förändras med omfattning och starttid. Alltså att en efterfrågeprofil skapas utifrån rådande laddningsmönster och att frihetsgrader sedan tillämpas för laddningens tidsåtgång och starttid. En längre laddningstid skulle då innebära att batteriet kan laddas ur med en lägre uteffekt. Frihetsgrader kan sedan ges i form av variabelbegränsningar likt modellen som beskrivs i Kapitel 6.1.2. Detta skulle skapa ett mer dynamiskt uttag och analyser kan då genomföras för hur stort batteri som skulle behövas om en kombination av ökade laddningstider och förändrade starttider applicerades på systemet.

9

Slutsatser

För att besvara syftet med detta arbete skapades en matematisk modell av verksamheten. Utifrån den mätdata som samlats från projektet Skanska E02 kunde simuleringar och datasammanställningar genomföras för att erhålla insikter om verksamhetens energianvändning och behov av stationär energilagring. Studien understryker vikten av att ta hänsyn till hela laddningsmönstret snarare än att endast fokusera på effekttoppar vid dimensionering. Resultatet kan användas som underlag vid dimensionering och planering av laddinfrastruktur för framtida elektrifierade bygg- och anläggningsprojektet. Studien bidrar även med att utveckla förslag på metoder som kan användas för att analysera mätdata inom bygg- och anläggningsprojekt.

Arbetet visar att den optimala storleken på stationära energilagringsenheter vid bygg- och anläggningsprojekt varierar beroende på tillgänglig effekt från nätet, laddningsrutiner och storleken på fordonsflottan. Det presenteras även underlag för hur stor del av verksamhetsdagarna som energilagringsenheter kan dimensioneras utefter. Vid lägre nätanslutningar och tillägg av nya fordon är behovet av stationära energilagringssystem större. För att minska behovet av energilagring kan laddningsrutiner anpassas och stora skillnader kan åstadkommas redan vid mindre rutinförändringar. Således bör värdet av rutinförändringar och ökade kostnader för högre nätanslutningar vägas med de kostnadsökningar som tillkommer vid investeringar i stationära energilagringssystem.

Ett särskilt värde med studien är de metoder som utvecklats för att ta fram resultaten – dels hur data har sammanställts och tillämpats i den matematiska modellen, dels hur Monte Carlo-simuleringar har använts för att analysera verksamhetsförändringar. Dessa metoder kan utgöra en grund och fungera som inspiration för framtida modellering och användning av tillgänglig data inom bygg- och anläggningssektorn.

Litteraturförteckning

[1] Building materials and the climate: Constructing a new future, 2023. URL https://wedocs.unep.org/20.500.11822/43293/.

[2] Utsläpp av växthusgaser från bygg- och fastighetssektorn, 2024. URL https://www.boverket.se/sv/byggande/hallbart-byggande-och-forvaltning/miljoindikatorer---aktuell-status/vaxthusgaser.

[3] Om eviny, 2025. URL https://www.eviny.se/om-eviny.

[4] Husam Mahdi Al-Alwash, Eugen Borcoci, Marius-Constantin Vochin, Indika A. M. Balapuwaduge, and Frank Y. Li. Optimization schedule schemes for charging electric vehicles: Overview, challenges, and solutions. *IEEE Access*, 12:32801–32818, 2024. doi: 10.1109/ACCESS.2024.3371890.

[5] J.G. Amar. The monte carlo method in science and engineering. *Computing in Science Engineering*, 8(2):9–19, 2006. doi: 10.1109/MCSE.2006.34.

[6] Edison Banguero, Antonio Correcher, Ángel Pérez-Navarro, Francisco Morant, and Andrés Aristizabal. A review on battery charging and discharging control strategies: Application to renewable energy systems. *Energies*, 11(4), 2018. ISSN 1996-1073. doi: 10.3390/en11041021. URL https://www.mdpi.com/1996-1073/11/4/1021.

[7] N.B.G. Brinkel, W.L. Schram, T.A. AlSkaif, I. Lampropoulos, and W.G.J.H.M. van Sark. Should we reinforce the grid? cost and emission optimization of electric vehicle charging under different transformer limits. *Applied Energy*, 276:115285, 2020. ISSN 0306-2619. doi: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115285. URL https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261920307972.

[8] The SciPy community. Optimization and root finding, 2025. URL https://scipy.org/faq/#how-can-scipy-be-fast-if-it-is-written-in-an-interpreted-langu

[9] Thomas A. Cruse. *Reality-based Mechanical Design*. CRC Press, 1997.

[10] Yassir Dahmane, Raphael Chenouard, Malek Ghanes, and Mario Alvarado-Ruiz. Coordinated charging of large electric vehicle fleet in a charging station with limited transformer power. In *2020 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA)*, pages 1054–1059, 2020. doi: 10.1109/CCTA41146.2020.9206272.

[11] Lee Dong In, Junhong Park, Myunghwang Shin, Jongtae Lee, and Sangki Park. Characteristics of real-world gaseous emissions from construction machinery. *Emergies*, 15(24), 2022. doi: https://doi.org/10.3390/en15249543.

[12] Elmeri Ekström and Oskari Marjanen. Energy concepts of the port of vaasa. 2024.

[13] Kyrre Kirkbakk Fjær, Venkatachalam Lakshmanan, Bendik Nybakk Torsæter, and Magnus Korpås. Heavy-duty electric vehicle charging profile generation method for grid impact analysis. In *2021 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*, pages 1–6, 2021. doi: 10.1109/SEST50973.2021.9543135.

[14] Anna Fredriksson, Carl Henrik Häll, Mats Janné, Fredrik Dunér, Rickard Malm, and Lars Bern. Hur ska vi få råd att elektrifiera byggtransporter? *Electrified and Efficient Construction Transport*, 2023. ISSN 0926-5805. doi: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2009.09.005. URL `https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092658050900140X`.

[15] Nikhil Garwa and Khaleequr Rehman Niazi. "impact of ev on integration with grid system – a review". In *2019 8th International Conference on Power Systems (ICPS)*, pages 1–6, 2019. doi: 10.1109/ICPS48983.2019.9067587.

[16] Geeks. Data analysis using monte carlo simulation. 2024. URL `https://www.geeksforgeeks.org/data-analysis-using-monte-carlo-simulation/`.

[17] Kaj Holmberg. *Kombinatorisk optimering med linjärprogrammering*. Matematiska Institutionen Linköpings tekniska högskola, 2006.

[18] Tianliang Lin, Yuanzheng Lin, Haoling Ren, Haibin Chen, Qihuai Chen, and Zhongshen Li. Development and key technologies of pure electric construction machinery. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 132:110080, 2020. ISSN 1364-0321. doi: https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110080. URL `https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032120303713`.

[19] Jan Lundgren, Mikael Rönnqvist, and Peter Värbrand. *Optimeringslära*. Studentlitteratur, 2008.

[20] K. Prakash, M. Ali, M.N.I. Siddique, A.K. Karmaker, C.A. Macana, Daoyi Dong, and H.R. Pota. Bi-level planning and scheduling of electric vehicle charging stations for peak shaving and congestion management in

low voltage distribution networks. *Computers and Electrical Engineering*, 102:108235, 2022. ISSN 0045-7906. doi: https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2022.108235. URL https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045790622004712.

[21] Kurtis Pykes. Optimization in python: Techniques, packages, and best practices, 2025. URL https://www.datacamp.com/tutorial/optimization-in-python.

[22] Ji Qiang and Chad Mitchell. A unified differential evolution algorithm for global optimization. *Lawrence Berkeley National Laboratory*.

[23] Md Ahsanul Hoque Rafi and Jennifer Bauman. A comprehensive review of dc fast-charging stations with energy storage: Architectures, power converters, and analysis. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 7(2): 345–368, 2021. doi: 10.1109/TTE.2020.3015743.

[24] Shane. Trucks and buses, 2023. URL https://www.iea.org/energy-system/transport/trucks-and-buses#tracking/.

[25] SKANSKA. Minst 50 procent eldrift – ökade krav i skanskas nästa entreprenad e02 i slakthusområdet. 2024. URL https://www.skanska.se/om-skanska/press/nyheter/minst-50-eldrift-okade-krav-i-skanskas-nasta-entreprenad-e02-i-?utm_source.

[26] Fuad Un-Noor, Wu Guoyuan, Harikishan. Perugu, Sonja Collier, Seungju Yoon, Mathew Barth, and Kanok Boriboonsomsin. Off-road construction and agricultural equipment electrification: Review, challenges, and opportunities. *Vehicles*, 4:780–807, 2022. doi: https://doi.org/10.3390/vehicles4030044.

[27] Ji Wu, Hao Su, Jinhao Meng, and Mingqiang Lin. Electric vehicle charging scheduling considering infrastructure constraints. *Energy*, 278: 127806, 2023. ISSN 0360-5442. doi: https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127806. URL https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544223012008.

[28] Yian Yan, Jiuchun Jiang, Weige Zhang, Mei Huang, Qiang Chen, and Huang Wang. Research on power demand suppression based on charging optimization and bess configuration for fast-charging stations in beijing. *Applied Sciences*, 8(8), 2018. ISSN 2076-3417. doi: 10.3390/app8081212. URL https://www.mdpi.com/2076-3417/8/8/1212.

[29] Rafi Zahedi, Natalie Lord, Kourosh SedghiSigarchi, and Rajit Gadh. Simultaneous optimal sizing of multi heavy-duty electric charging infrastructures connected to different electric utilities considering demand charges. In *2024 IEEE International Conference on Smart Mobility (SM)*, pages 93–98, 2024.

[30] Jonas Ärlebäck. Matematiska modeller och modellering - vad är det? [in swedish: Mathematical models and modelling - what is it?]. 2013:21–26, 01 2013.