



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2021 30 stp
Fakultet for realfag og teknologi

Fleksibilitet i parkerte elbiler ved næringsbygg: En casestudie av Oslo lufthavn Gardemoen

Flexibility from parked electric vehicles in
commercial buildings:
A case study of Oslo airport, Gardermoen

Rasmus Gåsemyr Tveitane
Miljøfysikk og fornybar energi

Forord

Denne oppgaven, skrevet våren 2021, er avslutningen av min fem år lange studietid ved Norges Miljø- og Biovitenskapelige universitet og en mastergrad i Miljøfysikk og fornybar energi. Det har vært en fantastisk tid fylt med mange gode minner, spennende mennesker og interessant læring. Jeg ser frem til å ta fatt på det resten av livet har å bringe, men vil alltid huske tiden jeg hadde på Ås.

Jeg vil takke min hovedveileder Heidi Samulesen Nygård og biveileder Thomas Martinsen. Dere kom med gode innspill og ideer til en til tider rådløs student. En stor takk også til Wiggo Roar Dehli fra Avinor for hjelp til med å hente ut data og svar på alle slags spørsmål.

Kjære Ane. Takk for at du støtter meg og passer på meg når jeg ikke er like flink til det selv. Dette semesteret hadde vært helt annerledes om jeg ikke hadde hatt deg. Takk til mine foreldre, Bjørg og Olav, for hjelp med korrekturlesning og oppmuntrende ord når det trengs. Dere har alltid trodd på meg og latt meg gjøre det jeg ønsker, så lenge det ikke er å studere økonomi. Takk til Mette og Per for oppmuntring og fôring av to fattige studenter.

Arbeidet med oppgaven har til tider vært en tung prosess. Det er ikke uten en viss melankoli jeg ser tilbake på hvor begrenset den siste tiden på studiet har vært. Likevel gir det meg stor glede å fullføre denne oppgaven og studietiden, og jeg ser frem til en lysere fremtid hvor pandemi og restriksjoner bare er et vagt minne.

Ås, 1. juni 2021

Rasmus Gåsemyr Tveitane

Sammendrag

Ny fornybar energi i kraftsystemet vil føre til et tap i fleksibilitet i kraftproduksjonen. I tillegg til dette kan den økte andelen elbiler i den norske bilparken føre til problemer for overføringssystemet lokalt. En løsning på begge disse problemene er å styre lading av elbiler for å redusere toppen i effektuttak, og tilføre kraftsystemet verdifull fleksibilitet. Denne oppgaven undersøker fleksibilitet i parkerte elbiler ved Oslo lufthavn Gardermoen.

Parkeringsdata fra parkeringshuset P10 ved Oslo lufthavn Gardermoen ble benyttet til å undersøke hvilke trender det fantes i parkeringsmønsteret. Datasettet omhandlet parkering fra september 2020 til mars 2021, da det ikke fantes tidligere data. Ved analyse av parkeringsdata ble det tydelig at bilene som parkerer i P10 jevnt over har en lang parkeringstid. Dette korresponderer direkte til bilenes potensiale for fleksibilitet.

En estimert ladeeffekt ble beregnet for å anslå hvor stort potensiale for fleksibilitet de parkerte bilene hadde. Denne ble beregnet ved å benytte oppgitt ladeeffekt fra et utvalg batteridrevne elektriske biler i det norske markedet. Effekten ble så brukt til å estimere effektforbruket til elbillading ved P10. Da dette ble sammenlignet med de målte AMS-data fra bygget stemte de godt overens.

Den estimerte ladeeffekten ble brukt til å beregne hvor lenge bilene stod parkert uten å trekke effekt, kalt idletid. Denne størrelsen ble brukt sammen med den estimerte effekten til å bestemme fleksibilitetspotensialet til elbilene i P10. Dette potensialet viste seg å være stort i forhold til effekten som ble ladet.

For å realisere dette potensialet ble en fordelingsstrategi som fokuserte på å fylle daler i det øvrige effektforbruket på bygget. Denne ble så benyttet på diverse scenarier simulert ved Monte Carlo metoden. I scenarioene ble enkelte forutsetninger for ladingen endret, som ladeeffekt, parkeringstid og energibehov. Under alle scenarioene ble det vist at fordeling ville senke effekttopper i bygget, med en varierende godhet.

Opgaven demonstrerer at det er mye fleksibilitet å hente fra parkerte elbiler ved Oslo lufthavn Gardermoen. Fleksibilitetspotensialet er høyt i forhold til effektforbruket til lading av elbilene, og kan dermed tenkes at forblir høyt ved flere biler. Ved å benytte en enkel fordeling vil effekttopper på hele bygget kunne senkes, selv ved lav ladeeffekt og kortere parkeringstid. Dersom det ankommer flere biler ser man at det fremdeles vil være en effekt av å styre ladingen, men her er usikkerheten større.

Abstract

New renewable energy in the power system will result in loss of flexibility from the power production. In addition to this, the increase in electric vehicles (EVs) in the Norwegian car fleet could result in problems for the local transmission systems. A solution to both problems would be to regulate the charging of the electric vehicles, to supply the power system with flexibility. This thesis examines the flexibility from parked EVs at Oslo airport Gardermoen.

Parking data from the parking garage P10 at Oslo airport is used to examine the trends in parking patterns at the airport. The dataset includes data from September 2020 to March 2021, as there was no prior data. The analysis shows a long mean parking duration for most of the EVs present. This directly effects the cars potential for flexibility.

An estimated charging power is calculated as a tool to estimate the potential for flexibility. This was done by utilizing known charging powers of a selection of battery electric vehicles from the Norwegian market. The estimated power was then used to calculate the power consumption of the electric vehicle charging. When compared to the actual consumption, it agreed well.

The estimated charging power was then used to calculate how long EVs stood parked without drawing power, called idletime. The idletime was utilized together with the estimated charging power to compute the potential for flexibility. This potential was quite large compared to the power consumed.

To realize the potential, a method for distribution of the EV charging with a bias towards filling valleys in the remaining power consumption was utilized. This method used on several simulated scenarios, simulated by the Monte Carlo method. In each scenario a prerequisite for the EV charging was changed, such as Charging power or parking duration. In every scenario the method succeeded in lowering the peak power consumption, with a varying degree of success.

All in all, this thesis demonstrates that there is a large amount of flexibility in parked EVs at Oslo Airport. The potential for flexibility is large compared to the consumed power and can therefore be predicted to still be large with a larger amount of EVs. With simple distribution methods the peak power consumption can be lowered, even with lower charging power or shorter parking duration. Even with a larger amount of EVs, the method used in this thesis would lower peak power consumption, although the uncertainties are greater for these scenarios.

Innhold

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Introduksjon | 1 |
| 2 | Teori | 3 |
| 2.1 | Det elektriske kraftsystemet | 3 |
| 2.2 | Energilagring | 7 |
| 2.2.1 | Batteri | 7 |
| 2.2.2 | Litium-ion batterier | 10 |
| 2.3 | Elbiler | 12 |
| 2.4 | Simulering | 13 |
| 2.4.1 | Monte Carlo metoden | 13 |
| 2.4.2 | Sannsynlighetsfordelinger | 13 |
| 3 | Metode | 15 |
| 3.1 | Gardermoen | 15 |
| 3.2 | Databehandling | 17 |
| 3.3 | Fleksibilitetspotensiale | 18 |
| 3.4 | Simulering | 19 |
| 3.4.1 | Scenarier | 23 |
| 4 | Resultat og diskusjon | 25 |
| 4.1 | Dataanalyse | 25 |
| 4.2 | Fleksibilitetspotensiale | 26 |
| 4.2.1 | Ladeeffekt | 26 |
| 4.2.2 | Fleksibilitetspotensiale | 29 |
| 4.3 | Simulering | 31 |
| 4.3.1 | Scenarier med konstant ankomst | 31 |
| 4.3.2 | Scenarier med flere ankomster | 41 |
| 4.4 | Generell diskusjon | 45 |
| 5 | Konklusjon og videre arbeid | 48 |
| 5.1 | Konklusjon | 48 |
| 5.2 | Videre arbeid | 49 |
| A | Alle resultater | 53 |
| A.1 | Estimert effektforbruk | 53 |
| A.2 | Fleksibilitetspotensiale | 61 |
| A.3 | Simuleringsresultater | 66 |

Figurer

| | | |
|------|---|----|
| 2.1 | Enkel fremstilling av det norske kraftsystemet. | 4 |
| 2.2 | Eksempel på lastflytting | 5 |
| 2.3 | Enkel skjematisk representasjon av en galvanisk celle. | 8 |
| 2.4 | Oppbygging av et Litium-ion batteri | 10 |
| 2.5 | Ladekurve for litium-ion batteri | 11 |
| 2.6 | Kurve av normalfordeling. | 14 |
| 3.1 | Flyfoto av Oslo lufthavn Gardemoen og parkeringshus P10. Bilde hentet fra [28]. Firkant og tekst tegnet på. | 15 |
| 3.2 | Oversikt over strømsystemet i parkeringshuset P10 | 16 |
| 3.3 | Flytskjema for hvordan AMS-dataene blir delt inn i daler | 21 |
| 3.4 | Flytskjema for fordeling av elbillading i effekt-daler | 22 |
| 4.1 | Fordeling av parkeringstid etter ankomsttid | 26 |
| 4.2 | Målt effektforbruk sammenlignet med estimert effektbruk for ladeeffekter $7,2kW$ og $8,1kW$ | 27 |
| 4.3 | Målt effektforbruk sammenlignet med estimert effektbruk for ladeeffekter $7,2kW$ og $8,1kW$ | 27 |
| 4.4 | Estimert fleksibilitetspotensiale for oktober måned 2020. | 29 |
| 4.5 | Estimert fleksibilitetspotensiale for oktober måned 2020. | 30 |
| 4.6 | Simulert effektforbruk ved fordeling 2 under normal drift | 32 |
| 4.7 | Varighetskurve for det simulerte effektforbruket under normal drift, med 95% persentil | 33 |
| 4.8 | Varighetskurve for det simulerte effektforbruket under normal drift | 34 |
| 4.9 | Varighetskurve for det simulerte effektforbruket ved ladeeffekt på $22kW$ | 35 |
| 4.10 | Varighetskurve for det simulerte effektforbruket ved høyere energibehov | 36 |

| | | |
|------|--|----|
| 4.11 | Varighetskurve for det simulerte effektforbruket ved ladeeffekt på 3,2kW | 37 |
| 4.12 | Varighetskurve for det simulerte effektforbruket ved lavere parkeringstid | 38 |
| 4.13 | Simulert effektforbruk ved fordeling 2 ved antall forventede ladeøkter skalert med faktor 5 | 41 |
| 4.14 | Varighetskurve for det simulerte effektforbruket ved antall forventede ladeøkter skalert med faktor 5, med 95% persentil | 42 |
| 4.15 | Simulert effektforbruk ved fordeling 2 ved antall forventede ladeøkter skalert med faktor 10 | 43 |
| 4.16 | Varighetskurve for det simulerte effektforbruket ved antall forventede ladeøkter skalert med faktor 10, med 95% persentil | 44 |
| A.1 | Målt effektforbruk sammenlignet med estimert effektbruk for perioden 21. til 30. september 2020 | 54 |
| A.2 | Målt effektforbruk sammenlignet med estimert effektbruk for perioden 1. til 30. november 2020 | 55 |
| A.3 | Målt effektforbruk sammenlignet med estimert effektbruk for perioden 1. til 31. oktober 2020 | 56 |
| A.4 | Målt effektforbruk sammenlignet med estimert effektbruk for perioden 1. til 31. desember 2020 | 57 |
| A.5 | Målt effektforbruk sammenlignet med estimert effektbruk for perioden 1. til 31. januar 2020 | 58 |
| A.6 | Målt effektforbruk sammenlignet med estimert effektbruk for perioden 1. til 28. februar 2021 | 59 |
| A.7 | Målt effektforbruk sammenlignet med estimert effektbruk for perioden 1. til 23. mars 2021 | 60 |
| A.8 | Estimert fleksibilitetspotensiale for perioden 21. til 30 september 2020. | 62 |
| A.9 | Estimert fleksibilitetspotensiale for perioden 1. til 31 oktober 2020. | 62 |
| A.10 | Estimert fleksibilitetspotensiale for perioden 1. til 30 november 2020. | 63 |
| A.11 | Estimert fleksibilitetspotensiale for perioden 1. til 31 desember 2020. | 63 |
| A.12 | Estimert fleksibilitetspotensiale for perioden 1. til 31 januar 2021. | 64 |
| A.13 | Estimert fleksibilitetspotensiale for perioden 1. til 28 februar 2021. | 65 |
| A.14 | Estimert fleksibilitetspotensiale for perioden 1. til 23 mars 2021. | 65 |

| | |
|---|----|
| A.15 Resultater for simulering av normal drift. | 67 |
| A.16 Resultater for simulering ved ladeeffekt på $22kW$ | 68 |
| A.17 Resultater for simulering ved høyere energibehov. | 69 |
| A.18 Resultater for simulering ved ladeeffekt på $3,2kW$ | 70 |
| A.19 Resultater for simulering ved lavere parkeringstid | 71 |
| A.20 Resultater for simulering ved antall forventede ladeøkter skaler med faktor 5. | 72 |
| A.21 Resultater for simulering ved antall forventede ladeøkter skaler med faktor 10. | 73 |

Tabeller

| | |
|---|----|
| 2.1 Energilagringsteknologier | 7 |
| 2.2 Oversikt over batterikapasitet og ladeeffekt på ombordlader for 6 biler på det norske markedet | 12 |

Ordliste

AC Alternating current - Vekselstrøm.

AMS Avanserte måle- og styringssystemer.

BKK Bergen kommunale kraftselskap.

DoD Dept of discharge - Mengden kapasitet som er utladet.

DSO Distribution system operator - Nettoperatør for distribusjonsnett.

kW Kilowatt.

kWh Kilowatttimer.

NVE Norges vassdrags- og energidirektorat.

OCV Open circuit voltage - Spenningen mellom poler på et batteri uten last.

SMES Superconducting magnetic energy storage - Superledende magnetiske energilagringssystemer.

SoC State of charge - Mengden kapasitet som gjenstår.

TSO Transmission system operator - Nettoperatør for transmisjonsnett.

Kapittel 1

Introduksjon

Bakgrunn

Elektriske energi er en ressurs nordmenn benytter seg av hver dag. Enten det er å slå på lyset på morgenen, skru på datamaskinen på hjemme eller sette på vaskemaskinen på kveldene kreves det elektrisk energi i form av strøm. Elektrisk energi er ferskvare og må produseres på samme tid som det forbrukes. Det betyr at når en slår på kaffetrakteren om morgenen, må de som produserer energien den brukes produserer litt mer. Historisk har vannkraftverk stått for produksjonen av elektrisk energi i Norge[1], men fremover kommer det til å komme flere andre energikilder som sol- og vindkraft til å bli benyttet[2].

Fornybare energikilder som sol- og vindkraft vil være essensielle for å kunne avvikle klimafarlig energiproduksjon fra gass- og kullkraftverk. Det er avgjørende for at ikke temperaturstigningen fra 1850 til 2100 skal overskride 1,5 grader, som beskrevet i parisavtalen[3]. En utfordring med disse energikildene er at de ikke er like lette å regulere som de tradisjonelle produksjonsmetodene kull- og vannkraft. Produksjonen bestemmes av når solen skinner eller vinden blåser. Siden produksjonen uansett må være likt forbruket er en nødt til å finne andre måter å opprettholde balansen på.

Samtidig med denne utviklingen har elbilsalget i Norge hatt en rask vekst de siste årene[4]. Det kongelige samferdselsdepartementet har satt som mål at alle nye personbiler skal være elektrisk innen 2025 [5]. Dette vil føre til at det i større grad vil være elektrisitet som driver transportsektoren fremover. Lading av elektriske personbiler og andre elektriske kjøretøy vil bli en ny del av forbruket som produksjonen må forsyne. I tillegg fører det at nordmenn lader bilen hjemme, gjerne like etter de har kommet hjem fra jobb, at dette forbruket fordeler seg over en kort tid på døgnet. Dette kan i verste fall føre til overbelastning av strømlinjer og transformatorstasjoner[6].

Løsningen på begge disse problemene kan være å legge lading av elbiler til andre tider på døgnet. Parkerte biler står gjerne lenge koblet til ladepunktet sitt, og ved smart styring av oppladningen kan energien bilene trenger tilføres når det er overskudd av produksjon fra for eksempel sol- eller vindkraft.

Motivasjon

Prosjektet NeX2G er et samarbeid mellom Norges Miljø og Biovitenskapelige universitet, Oslomet, Avinor, Statnett, Elvia og Lyse. Prosjektet skal undersøke fleksibilitetspotensialet i parkerte elektriske biler ved Oslo lufthavn Gardermoen og undersøke hvordan en kan ta i bruk toveislading for realisere fleksibiliteten i bilene. Her står bilene ofte lenge parkert og kan derfor lades opp og ut flere ganger for å bistå det elektriske systemet på flyplassen.

I den forbindelse er det interessant å gjøre en innledende undersøkelse av elbilladingen på Oslo lufthavn Gardermoen. Hvilke data som er tilgjengelig og hvordan de kan brukes er viktig å svare på for forskningsprosjektet. Derfor tar denne oppgaven for seg fleksibilitet i elbillading ved flyplassen. Oppgaven undersøker kun fleksibilitet knyttet til styring av lading, og ikke toveislading.

Problemstilling

Hovedmålet med denne oppgaver er å begynne med arbeidet med å anslå hvor mye fleksibilitet det vil være i parkerte elektriske biler ved Oslo lufthavn Gardermoen. Dette ble gjort ved å undersøke fire undermål. Alle målene er presentert under.

Hovedmål:

(H): Anslå mengden forbrukerfleksibilitet som finnes i parkerte elbiler ved Oslo lufthavn Gardermoen.

Undermål:

- (U1): Undersøke historiske parkeringsdata fra parkeringshust P10 ved Oslo lufthavn Gardermoen.
- (U2): Estimere ladeeffekt for elbillading og sammenligne med målte AMS-data fra P10.
- (U3): Estimere fleksibilitetspotensialet til elbillading som et produkt av den estimerte ladeeffekt og parkeringstid til elbilene.
- (U4): Undersøke sensitiviteten den realisererte fleksibiliteten har for endring i forutsetninger ved simulering med Monte Carlo metoden.

Kapittel 2

Teori

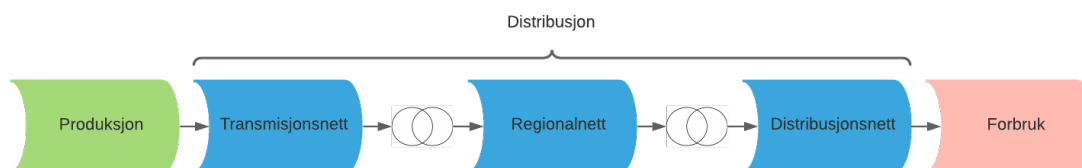
2.1 Det elektriske kraftsystemet

Det norske kraftsystemet har tre hovedkomponenter: produksjon, overføring og forbruk. Produksjon er ansvarlig for å produsere energien som blir brukt av konsumentene, mens transmisjonen bringer energien fra den ene til den andre. Hovedregelen som må oppfylles for at kraftsystemet skal kunne operere er at energien som blir produsert og importert må til enhver tid være lik energien som blir brukt pluss eventuelle tap under overføring. Dette betyr i praksis at det foregår en hårfin balansegang der kraftprodusentene må tilpasse produksjonen etter forbruket der og da. I 2019 stod vannkraft for 93,4 % av energiproduksjonen mens varmeproduksjon og vindkraft stod for henholdsvis 2,5 % og 4,2 % [1].

En enkel fremstilling av det norske kraftsystemet vises i figur 2.1 . Distribusjonen er delt inn i tre forskjellige nivåer som tar for seg overføringen av energien fra produsentene, transmisjonsnettets, regionalnettets og distribusjonsnettets. Transmisjonsnettets, også kalt sentralnettets, transporterer energi mellom landsdeler og over landegrensene. Nettets har spenningsnivå på 420, 300 og 132 kV. Det har en slik høy spenning for å minimere tap under overføring av energi. Ved høy spenning kreves det mindre strøm for å overføre samme mengde effekt. Dette fører til mindre ohmske tap, gitt av formelen

$$P_{Tap} = R * I^2 \quad (2.1)$$

hvor P_{Tap} er effekten som går tapt, R er den resistive motstanden i linjen og I er strømmen som går i linjen. transmisjonsnettets er drevet av en TSO (Transmission System Operator), som i Norge er statsforetaket Statnett.



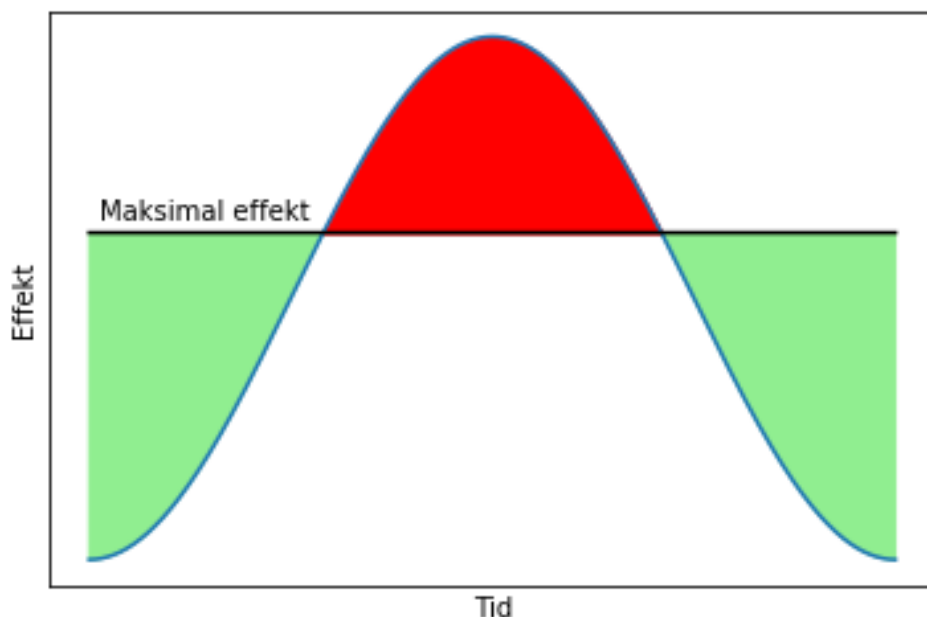
Figur 2.1: Enkel fremstilling av det norske kraftsystemet.

De neste nettene i rekken er regionalnettet og distribusjonsnettet. Hvis transmisjonsnettet kan beskrives som strømmnettets europaveier, blir regionalnettet strømmnettets fylkesveier. Regionalnettet har spenningsnivåer fra 66 til 132 kV. Nettet eies og driftes av selskaper som BKK og Lyse Elnett, og virker som et bindeledd mellom transmisjonsnettet og distribusjonsnettet. Distribusjonsnettet er det nettet som bringer strømmen til de ulike lokalmiljøene. Dette nettet driftes av DSO (Distribution System Operator) og har et spenningsnivå fra 230 V til 22 kV.

Konsumentene eller forbrukerne er alle som benytter elektrisk energi fra energisystemet. Dette være seg husholdninger, industri eller transportsektoren. I 2019 var dette fordelt på bergverksdrift/industri, tjenesteyting og husholdninger/jordbruk med henholdsvis 44,7 %, 21,2 % og 34,1 % [1].

Lastflytting

Strømmnett, i alle sine underdeler, må til enhver tid være dimensjonert etter den størst tenkelige effekten det skal kunne levere. Derfor vil alle tiltak som reduserer maksimum belastning bidra til at strømmettet ikke må bygges ut[7]. For å redusere effektbelastningen over strømmettet kan man forflytte forbruk eller laster i tid, fra tider det er stor pågang til tider med lite pågang. I praksis kan en tenke seg en maksimal effekt, hvor enhver effekt større enn dette blir redusert til den maksimale effekten og den resterende effekten må tas ut ved et tidspunkt hvor etterspørselen er tilstrekkelig lav. I figur 2.2 illustreres hvordan dette kan foregå. Effekt fra det røde området flyttes til det grønne området under den gitte maksimalverdien.



Figur 2.2: Eksempel på lastflytting. Effekt i det røde området over maksimalverdien flyttes til en annen tid under i det grønne området under maksimalverdien.

Strømkostnad

I Norge bestemmes strømprisen av tre ledd: nettleie, strømkostnad og avgifter[8]. Hvor størrelsen på disse bestemmes av hvilken avtale man har med sin kraftleverandør. Denne oppgaven tar for seg strømforbruk ved Oslo lufthavn Gardermoen. De betaler for kraft, nettleie, forbruksavgift, elsertifikater, påslag og effektledd[9]. Effektleddet er det leddet som vil bli fokusert på i denne oppgaven. Det styres av hvor mye effekt som trekkes over hver time. Dermed vil en reduksjon i effektforbruket ved for eksempel lastflytting kunne føre til reduserte kostander. Effektleddet ved Oslo lufthavn settes av den høyeste timeseffekten på hele anlegget over hele året, kalt den dimensjonerende timen. Dermed kan en senke strømprisen dobbelt ved å både senke effekten man bruker og også senke det man må betale for effekten.

Fremtidens energisystem

Energisystemet slik det er i dag er i endring. Elektrifisering av norsk sokkel, industri og transport vil føre til en økning i elektrisk energiforbruk på 20% frem mot 2040. Parallelt med dette vil produksjonen av elektrisitet øke med 16%. Denne økningen kommer i hovedsak av vannkraft, enten ny eller oppgradering av de allerede eksisterende anleggene, men også til dels i form av ny fornybar energiproduksjon som vindkraft, både til havs og på land, og solkraft[2].

Elektrifisering av bilparken vil i tillegg til å øke etterspørselen etter energi også kunne ha andre effekter på energisystemet. NVE anslår at strømnettet skal tåle en økning

på 1,5 millioner elbiler i bilparken[6]. Elbilene vil ha lite påvirkning på strømmettet nasjonalt, men kan føre til at transformatorer og overføringskabler kan få problemer lokalt dersom mange av bilene lader samtidig[10]. Dette ligner på fenomenet britene kaller ”TV pickup”, hvor store mengder tv-seere benytter seg av pauser i populære program til å sette på tekokere med høy effekt[11]. Det samme kan skje dersom nordmenn med elbiler alle kobler til bilene for lading når alle kommer hjem fra jobb. En situasjon der mange forbrukere endrer forbruket sitt betydelig på en relativt kort tidsperiode.

Fleksibilitet

Som tidligere nevnt må det alltid være balanse i produksjon og forbruk av elektrisk kraft. Dette gjør at laster eller produsenter som kan være fleksible er viktige for at overføringen skal skje så stabilt som mulig. Fleksibilitet i kraftnettet kan defineres som den andelen av forbruk og produksjon som kan reguleres[12]. I prinsippet kan en regulere alt forbruk og produksjon, men dette kan i mange tilfeller føre til høye kostnader. Derfor er det viktig og identifiserer hvor i kraftsystemet en finner en høy grad av fleksibilitet.

Vannkraft der vann lagres i magasiner har en høy grad av fleksibilitet. Vann kan lagres i magasiner, og produksjonen av energi kan reguleres ved behov. Vannkraftverk kan også regulere produksjonen raskt og har lave kostnader knyttet til start og stopp. Den store utbredelsen av magasinell vannkraft i Norge har ført til at det har vært stor fleksibilitet i det norske kraftsystemet.

På forbrukersiden kan man også finne eksempler på teknologier med høy grad av fleksibilitet, som for eksempel elektriske biler. I [13] ble det undersøkt hvordan elektriske biler kun bidra til å øke fleksibilitet i et boligbygg med 1058 leiligheter. Der kom det fram at det var et stort potensiale for å flytte laster ved hjelp av elbiler som fleksible laster. Et viktig moment med denne typen fleksibilitet er å implementere det på en slik måte at det ikke irriterer forbruker[14][15]. For eksempel må ikke lading av elbil forskyves slik at bilen ikke kan kjøres når eieren vil det.

Større andeler uregulerbar kraft i form av sol- og vindkraft vil føre til mindre fleksibilitet i energiproduksjonen i det norske kraftsystemet. En fellesnevner for vind- og solkraft er at regulering av produksjonen er vanskeligere, ettersom den tilgjengelige energien er helt avhengig av været. Mengden energi tilgjengelig vil alltid være bestemt av hvor mye solen skinner eller vinden blåser. Denne nedgangen i fleksibilitet fører til at man må se etter andre metoder for å tilføre energisystemet fleksibilitet. Dette kan blant annet være gjennom energilagring.

2.2 Energilagring

Innføringen av energilagringssystemer i det norske energisystemet kan bidra til en større fleksibilitet. Det finnes en rekke ulike teknologier for å lagre energi med ulike egenskaper. I tabell 2.1 er det presentert et utvalg av energilagringsteknologier med bruksområder. Bruksområdene bestemmes av en rekke faktorer som for eksempel hvor stor lagringskapasitet teknologien har, hvor høy effekt den kan gi fra seg og hvor lenge den kan levere denne effekten[16].

Tabell 2.1: Energilagringsteknologier sortert etter lagringsform. Basert på [17]

| Form | Teknologi | Bruksområde |
|----------------|------------------|------------------------------------|
| Mekanisk | Pumpet vannkraft | Storskala energilagring |
| | Svinghjul | Effektkvalitet og frekvenskontroll |
| | Komprimert luft | Storskala energilagring |
| Elektrokjemisk | Batterier | Lastflytting |
| | Brenselsceller | Lastflytting |
| Elektrisk | Superkondensator | Lastflytting og effektkvalitet |
| | SMES | Lastflytting |

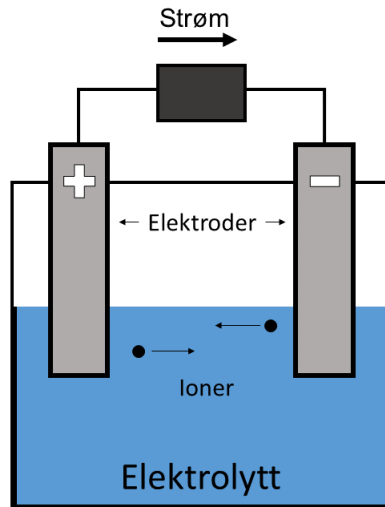
Lagring av energi er en god måte å jevne ut energitilførselen fra uregulerbar energi-produksjon, slik som vindkraft og solkraft. Dersom det er et overskudd av tilgjengelig energi, uten at det er behov for energien blant forbrukerne, kan energien lagres for å distribueres når det er et underskudd av energi.

2.2.1 Batteri

Batterier er en vidt utbredt metode for å lagre energi. Batterier deles inn i to forskjellige typer, primære batterier og sekundære batterier. Forskjellen på disse er at sekundære batterier kan lades opp igjen etter at energien lagret i det er brukt opp ved at det tilføres elektrisk energi ved å tilføre det en spenning som er høyere enn den levert fra batteriet. Batterier finnes i mange forskjellige størrelser og kjemisk sammensetning. De forskjellige sammensetningene i kjemier vil endre karakteren til batteriene i form av egenskaper som spenning, strøm, levetid, kapasitet og energitetthet.

Batterier består av en eller flere galvaniske elementer koblet i enten serie eller parallell. Batterispenningen blir da enten summen av, eller lik celledspenningen til elementene. I figur 2.3 er det en enkel skjematisk representasjon av en galvanisk celle. Cellene er som regel bygd opp av en positiv og en negativ elektrode, og en elektrolytt. Elektrolytten lar ladede partikler, eller ioner, bevege seg mellom elektrodene, men ikke elektroner. Elektronene kan ledes fra den ene elektroden til den andre for å skape strøm.

Forskjellen i elektronegativitet mellom de forskjellige elektrodene er det som bestemmer de teoretiske spenningen cellen kan levere uten last, kalt OCV (Open circuit voltage). Når cellen blir satt på en last vil denne spenningen senkes grunnet indre motstand i cellen. Denne indre motstanden kommer av hvor gode elektrodene er til å overføre de ladede partiklene i cellen, utarming av ladede partikler i elektrolytten



Figur 2.3: Enkel skjematisk representasjon av en galvanisk celle. I elektrolytten beveger ioner seg fra den ene elektroden til den andre. Elektroner ledes fra den negative elektroden til den positive gjennom en last.

rundt elektrodene og ohmske tap i de forskjellige ledende elementene i batteriet. Den sistnevnte av disse er avhengig av strømmen som går i batteriet og vil dermed endre seg ettersom batteriet er i bruk. De samme effektene fører til at spenningen som kreves ved lading av sekundære batterier må være høyere enn OCV[18][19].

Kapasitet

Kapasiteten til batteriet er et mål på hvor lenge batteriet kan leve under en gitt last. Det er gitt i ampertimer, Ah , og kan beregnes ved følgende likning,

$$C = I * t \quad (2.2)$$

hvor C er kapasiteten, I er strømmen batteriet lades ut med gitt i ampere, A , og t er tiden det tar for batteriet å lades ut i timer, h . Kapasiteten vil variere med forskjellig strøm og temperatur på batteriet. Derfor angis det ofte en nominell kapasitet på batterier, som er kapasiteten batteriet vil ha under kjente forhold. Dette er gjerne ved $25^{\circ}C$ og strøm som tilsvarer å tømme batteriet på fem timer fra fulladet. Ofte brukes C/t for strømmen som trengs for å tømme batteriet på en viss tid, t [18].

Mengden kapasitet tømt fra et batteri i forhold til hvor mye som originalt var tilgjengelig kalles "dept-of-discharge" (DoD) og beregnes på følgende måte,

$$DoD = \frac{C_{utladet}}{C_{originalt}}. \quad (2.3)$$

Her er $C_{utladet}$ mengden kapasitet som er fjernet fra batteriet under utladning og $C_{originalt}$ den kapasiteten batteriet hadde før utladning. Forholdet blir oppgitt som en prosentenh[18]. Komplementært bruker man begrepet "state-of-charge" (SoC)

om forholdet mellom kapasitet tilgjengelig og kapasitet originalt tilgjengelig. Det kan beregnes på følgende måte,

$$SoC = 100\% - DoD. \quad (2.4)$$

Energiinnhold og effekt

Kapasitet brukes som regel for å sammenligne batterier med like spenningsnivåer. Skal batterier som gir ulik spenning sammenlignes, er det vanlig å sammenligne energiinnholdet i batteriet. Energiinnholdet kan beregnes på følgende måte,

$$E = V * C \quad (2.5)$$

hvor E er energiinnholdet i Wh , V er spenningen batteriet leverer, her brukes gjerne OCV, og C er batteriets kapasitet. Energimengden som blir overført til en potensiell last avhenger av hvordan batteriet lades ut ettersom både kapasitet og spenningen batteriet leverer endres med forskjellig strøm[18].

I tillegg til energiinnhold kan batterier sammenlignes ved hjelp av deres spesifikke energiinnhold eller energitetthet. Spesifikt energiinnhold er et mål på hvor mye energi det er lagret i batteriet per masseenhet av batteriet, og energitetthet et mål på energi lagret per volum. Enhetene er Wh/kg og Wh/l eller Wh/dm^3 . Disse størrelsene er ofte viktige for batterier som skal kunne transporteres, ettersom en høyere verdi vil føre til et lettere eller mindre batteri med samme energiinnhold. I tillegg til energiinnhold er effekten batteriet kan levere interessant. Effektene, P , oppgis i W og kan på samme måte som ved energiinnholdet måles mot vekt og volum for å få spesifikk effekt og effektitetthet.

Hvorvidt et batteri scorer høyt på effekt eller energi har å gjøre med hvilket bruksområde batteriet er tenkt for. Dersom et batteri skal brukes for å bidra med kontinuerlig effekt eller korte pulser med høy effekt, vil designet være forskjellig. Ofte vil batterier som kan gi fra seg høy effekt ha et lavere energiinnhold[18].

Lading av sekundære batterier

Dersom batterier skal brukes for å oppnå en høyere fleksibilitet i kraftsystemet er dette nødt til å vær sekundære batterier. Dette fordi de kan lades opp når det er overskudd av energi, og lades ut ved et underskudd. Lading av batterier er ikke en triviell oppgave og det er mange faktorer som må tas hensyn til.

Når sekundære batterier lades tilføres de effekt i form av likestrøm som reverserer prosessen som skjer ved utlading. En del av den strømmen som sendes gjennom batteriet vil føre til at det skjer andre reaksjoner inne i battericellen og ikke bidra til å lade opp batteriet. Derfor defineres en ratio for hvor stor andel av strømmen som bidrar til å lade opp batteriet kalt "charge-acceptance", C_A , på følgende måte,

$$C_A = 100 * \frac{I - I_g}{I} \quad (2.6)$$

hvor I er den totale strømmen gjennom batteriet og I_g er den delen av strømmen som bidrar til andre bieffekter[18].

Lades et batteri etter det er fulladet vil det resultere i nedbryting av elektrolytten i batteriet. Hvis elektrolytten for eksempel er vannbasert vil det dannes hydrogen og oksyngass. Slik gassdannelse er uønsket ettersom det forbruker elektrisitet og ødelegger elektrolytten. For å unngå dette er det viktig å kontrollere at spenningen ikke blir for høy, spesielt når batteriet nærmer seg fulladet[18].

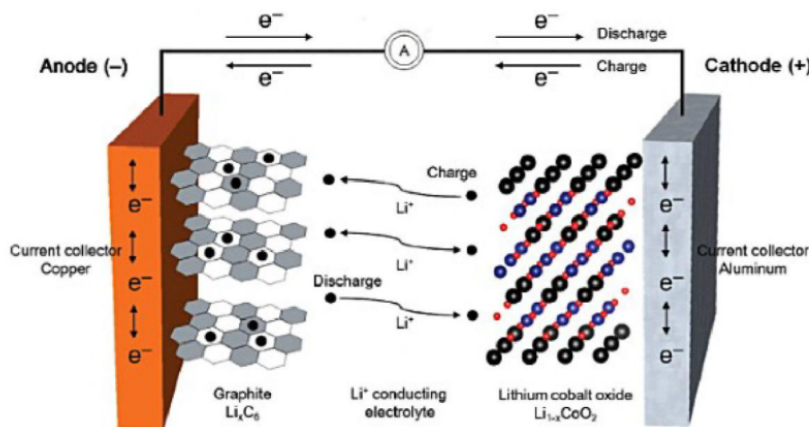
Det finnes flere strategier for å lade et batteri, alle med sine respektive fordeler og ulemper. Lading under konstant strøm kan gjøres med enkle ladere som ikke er spesielt dyre. En utfordring er å velge hvor høy strøm batteriet skal lades med. Velger en for lav strøm, tar hele ladeprosessen lang tid. Velger en derimot en for høy strøm, vil spenningen som trengs raskt øke og bidra til tap i form av for eksempel gassdannelse når batteriet nærmer seg fulladet. For å unngå de negative sidene ved konstant strøm kan en velge å lade batteriet ved en høy strøm i en periode for å så lade med en lav strøm når batteriet nærmer seg fulladet.

Lading kan også foregå under konstant spenning. Da blir strømmen bestemt av spenningsforskjellen mellom batteri og laderen. Ved denne ladestrategien vil strømmen starte veldig høyt og deretter raskt, nærmest eksponentielt, synke ettersom batteriet lades. Å lade batteriet helt fullt blir derfor tidkrevende.

En tredje ladestrategi går ut på å først holde strømmen konstant til spenningen når et punkt hvor det er sannsynlig at tap kan forekomme, som ved den tidligere nevnte gassdannelsen. Deretter las strømmen falle ved å holde spenningen konstant.

2.2.2 Litium-ion batterier

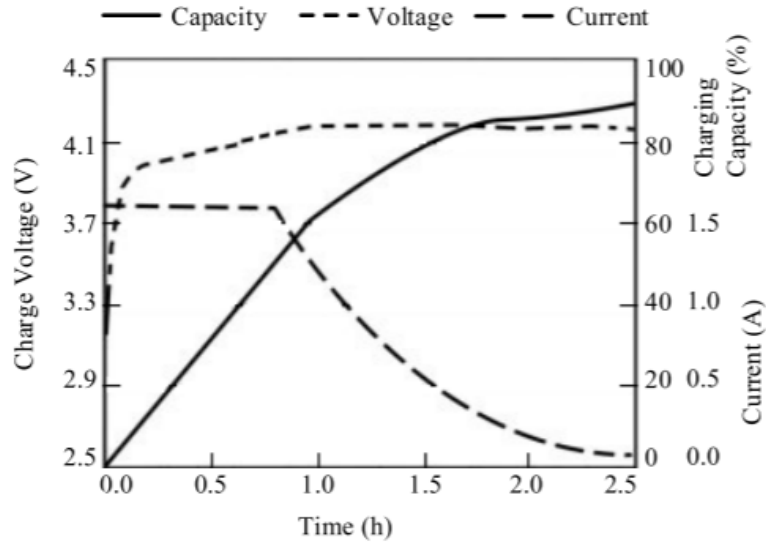
Litium-ion batterier er en type sekundære batterier hvor, som navnet tilsier, det er litiumioner som bærer ladning mellom de ulike elektrodene. En illustrasjon av hvordan en celle i et litium-ion batteri er oppbygd er vist i figur 2.4. Elektrodene består av grafitt og litium-koboltoksid. Ved både opp- og utlading er det litiumioner som beveger seg mellom elektrodene som ladningsbærer.



Figur 2.4: Oppbygging av et Litium-ion batteri. Elektrodene er av grafitt og litium-koboltoksid. Litiumioner bærer ladning mellom elektrodene ved både lading og utlading. Figur hentet fra [19] gjengitt med tillatelse.

Litium-ion batterier er blitt veldig populære ettersom markedet for portable elekt-

riske enheter har vokst. Batteriene har egnede egenskaper som høy energitetthet og spesifikt energiinnhold, et høyt operasjonelt spenningsnivå på 3.6V og god karakteristikk for opp- og utlading. En typisk ladekurve for litiumbatterier er vist i figur 2.5. Her lades batteriet med den tredje letestrategien nevnt i 2.2.1.



Figur 2.5: Ladekurve for litium-ion batteri, ved først konstant strøm og så konstant spenning. Linjene viser kapasitet, spenning og strøm over tid. Hentet fra[20] gjengitt med tillatelse

2.3 Elbiler

Denne delen tar for seg batteridrevne elektriske biler.

Andelen elektriske biler på norske veier øker. Andelen elbiler av nye biler kjøpt i 2020 var på 54,3% [4]. Dette mot 20,4% ladbar hybrid og tilsammen 16,5% bensin- og dieselbiler. I Nasjonal transportplan 2022-2033 fastslår regjeringen målsetningen om at alle nye personbiler skal være nullutslippsbiler i 2025[5], som batteridrevne elektriske biler er. Dette vil føre til at andelen elbiler vil fortsette å øke i tiden fremover.

Typisk brukes Litium-ion batterier i batteripakkene til elbiler[21]. Som vist i 2.2.2 bør litium-ion batterier lades først med konstant strøm og så konstant spenning. I tillegg til dette vil hvordan batteriene er satt sammen, hvilken lader bilen er utstyrt med og hvor mye effekt som er tilgjengelig, styre hvordan bilene lades. I tabell 2.2 er det listet utvalg elbiler fra det norske markedet med sine spesifikasjoner.

| Modell | Batterikapasitet[kWh] (netto) | Lader [kW] (AC) |
|------------------|--------------------------------------|------------------------|
| Nissan leaf | 57 (2019) | 6,6 |
| | 37 (2018) | 6,6 |
| | 21,6 og 27,2 (2011-2017) | 3,3 og 6,6 |
| Wolfsagen e-Golf | 31,5 | 7,2 |
| BMW i3 | 37,9 | 7,2 |
| Tesla model 3 | 50 (Standard range) | 11 |
| | 75 (Long range) | 11 |
| Tesla model S | 72,6 | 11 |
| | 98 | 11 |
| Audi e-tron | 64,7 og 86,5 | 11 |

Tabell 2.2: Oversikt over batterikapasitet og ladeeffekt på ombordlader for 6 biler på det norske markedet [22]

Tabellen viser at Nissan Leaf har økt batterikapasitet og ladeeffekt fra 2011. Grunnet til dette er tildels på grunn av at prisen på disse batteripakkene har falt de ti siste årene [23]. I tillegg har det spesifikke energiinnholdet i batteripakkene økt, som betyr at biler trenger mindre batterivekt for samme mengde energi[24]. Denne utviklingen kommer til å fortsette, blant annet lvoer Tesla 54% lengre kjørelengde og 56% lavere kostnader per kWh[24]. I praksis vil dette bety at vi får biler med større batterikapasitet og lengre rekkevidde på veiene.

2.4 Simulering

2.4.1 Monte Carlo metoden

For å simulere forholdene ved parkeringsanlegget på Gardermoen brukes en simuleringsmetode som kalles Monte Carlo simulering. Den moderne versjonen av metoden har sitt opphav fra 1940-tallet og benyttes når det gjøres beregninger som omhandler sannsynlighetsfordelingen. Disse beregningene er gjerne såpass komplisert algebraisk at det er nærmest umulig å løse analytisk[25]. Metoden går ut på å generere tilfeldige prøver mange ganger for å få en forventet løsning av et problem. De tilfeldige prøvene brukes for å imitere et konkret system, som i dette tilfellet blir ankomst av elbiler som skal lades[26]. Til å bestemme de tilfeldige prøvene kan en benytte forskjellige sannsynlighetsfordelinger.

2.4.2 Sannsynlighetsfordelinger

Sannsynlighetsfordelingene brukt i denne oppgaven er normalfordeling og poissonfordeling.

Normalfordeling

Normalfordelingen er den vanligste sannsynlighetsfordelingen for uavhengige tilfeldige variabler. Fordelingen er gitt av funksjonen

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.7)$$

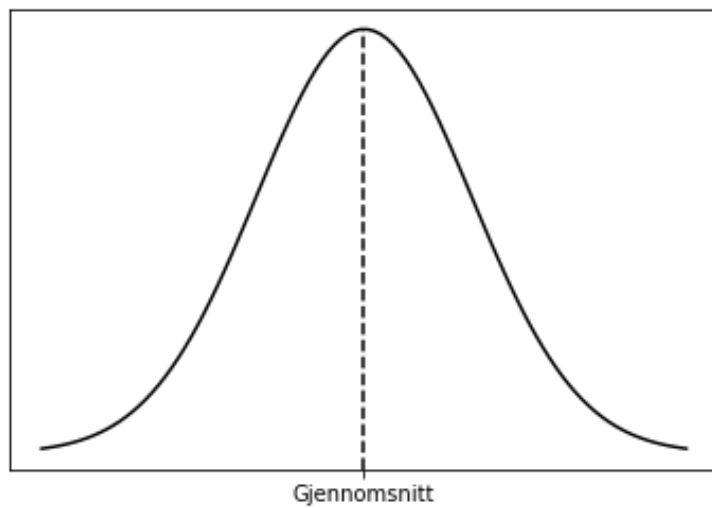
hvor $p(x)$ er sannsynligheten for utfallet x , η er konstanten Eulers tall, μ er gjennomsnittet og σ er standardavviket til fordelingen. Fordelingen er kjent ved sin karakteristiske kurve, vist i figur 2.6. Sannsynligheten for at en tilfeldig variabel blir tildelt en verdi som fra et intervall på akse er gitt ved arealet under kurven for det samme intervallet[27].

Poissonfordeling

Poissonfordelingen diskret sannsynlighetsfordeling. Det betyr at utfallet av fordelingen er et endelig antall verdier. Et eksempel er alle heltallene fra en til ti, i motsetning til alle tallene mellom en til ti, hvor antallet avhenger av antall desimaler man velger. Poissonfordelingen brukes ofte for å beskrive hendelser som skjer uavhengig og tilfeldig over tid, hvor gjennomsnittlig antall hendelser er kjent og holder seg konstant over tid. Eksempler på dette kan være antall ordre ett firma får på en dag eller antall partikler som emitteres fra et radioaktivt stoff over en viss tid. Poissonfordelingen er gitt ved funksjonen

$$p(x) = \frac{\eta^{-\lambda} \lambda^x}{x!} \text{ for } x = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (2.8)$$

hvor $p(x)$ er sannsynligheten for å observere x hendelser innenfor et gitt tidsintervall, η er Eulers tall og λ er det gjennomsnittlige antall hendelser i tidsintervaller. For store verdier av λ er poissonfordelingen lik normalfordelingen.



Figur 2.6: Kurve av normalfordeling.

Kapittel 3

Metode

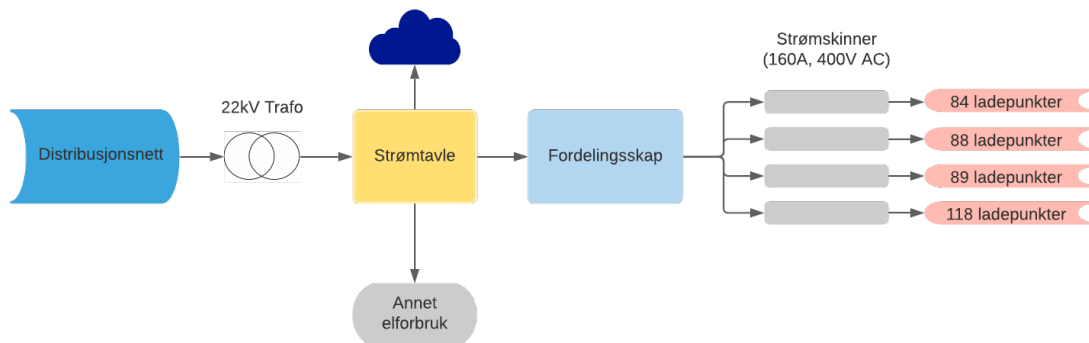
3.1 Gardermoen

Oslo lufthavn Gardermoen ligger på grensen mellom Nannestad og Ullensaker kommuner i Viken fylke. Ved flyplassen er det 8 utendørs parkeringsområder og 2 parkeringshus. Elbillading finnes i de to parkeringshusene P10 og P11. Denne oppgaven tar for seg P10, som vist i figur 3.1 ettersom den er nærmest terminalen og derfor antas å ha en høyere andel reisende. P11 antas å ha en høyere andel ansatte som parkerer og er dermed mindre interessant[9].



Figur 3.1: Flyfoto av Oslo lufthavn Gardemoen og parkeringshus P10. Bilde hentet fra [28]. Firkant og tekst tegnet på.

Parkeringshuset P10 har 379 parkeringsplasser med uttak til lading. Dette er fordelt på ladebokser hvor det er to uttak per boks. Uttaket er fordelt på fire strømskinner med henholdsvis 84, 88, 89 og 118 uttak. Ved hver strømskinne er det en måleboks av typen B23 112-100 fra ABB som måler effektuttaket hver time gjennom skinnen. Dette sendes til energioppfølgingsystemet Optima der det lagres. Ladeboksene er av typen Ensto Chago Wallbox EVB200. Den er utstyrt med en egen måler, og logger hvor mye energi som blir gitt til hver bil. Dette blir sent til deres eget oppfølgingsystem kalt Ensto EV. cloud. I tillegg blir tidspunkt for tilkobling og frakobling logget[9].



Figur 3.2: Oversikt over strømsystemet i parkeringshuset P10 ved Oslo lufthavn Gardermoen. Elektrisk energi kommer fra distribusjonsnettets og transformerer ned

3.2 Databehandling

Behandling av data ble gjort i programmeringsspråket Python ved hjelp av det integrerte utviklingsmiljøet Spyder. Data ble lagret i matriser ved hjelp av modulen Numpy.

AMS-data

Parkeringshuset P10 på Gardermoen lufthavn er kilden til data brukt i oppgaven. Som nevnt er ladeuttakene fordelt på fire strømskinner. Disse fordeler strøm fra en sikrings boks som er koblet til en transformator. Fra denne transformatoren går det også strøm videre til resten av huset. Ved hver skinne sitter det en automatisk måler som logger hvor mye effekt som trekkes gjennom skinnen. Dette måles på timeintervall og sendes til optima der AMS-data ble hente ut som en excel-fil for hver skinne. Excel-filene ble lest inn i Spyder ved hjelp av modulen Pandas og lagret i en Numpy matrise.

Ladeøkter

Hver ladestasjon logger hver ladeøkt. Økter fra før september 2020 ser ikke til ha blitt logget, selv om systemet skulle ha logget dem. For hver økt logges når bilen koblet til og fra ladepunktet, hvor mye energi som bilen ble forsynt med og hvilket tilkoblingspunkt som ble benyttet. Ladeøkter fra perioden 21. september 2020 til 23. mars 2021 ble hentet ut fra Ensto EV. cloud som excelfiler og anonymisert. Dette tilsvarer 1962 individuelle økter. I datasettet finnes flere økter der det trekkes under $0,5kWh$. For disse øktene antas det å ha skjedd en feil i tilkobling, eller at de ble avbrutt like etter tilkobling. Det finnes også flere økter der energien ladet er godt over $100kWh$. Ved disse øktene antas det at det også har vært en feil med loggingen ettersom det er få biler med så stor batterikapasitet[22]. Derfor ble økter der energi ladet er over $100kWh$ eller under $0,5kWh$ fjernet. Da gjenstår 1851 individuelle økter.

Datatrender

For å undersøke typiske trender ved parkeringsmønster ble parkeringstid per økt plottet mot lengden på oppholdet. Dette ble gjort ved å gruppere alle parkeringer etter ankomsttid og parkeringstid.

3.3 Flexibilitetspotensiale

Idletid

I [29] ble det foreslått en metodikk for å finne potensialet for fleksibilitet ved elbiler som stod og ladet ved boligbygg. Metoden gikk ut på å finne hvor lenge bilene står på parkeringsplassen uten å trekke effekt for å bestemme hvilket potensial det er for fleksibilitet i de parkerte elbilene. Dette blir fra nå omtalt som idletid. Idletid kan finnes ved å trekke tiden bilene står og trekker effekt fra den totale parkeringstiden. Etttersom den totale parkeringstiden er kjent, gjenstår å finne den totale tiden bilene lader. For å gjøre dette antas det at bilene trekker en konstant effekt frem til de er fullopladet. Som et utgangspunkt ble en effekt på $7,1kW$ benyttet, som var den foreslåtte effekten fra [29], før en ny representativ ladeeffekt ble beregnet.

Ladeeffekt

Etttersom det ikke er et mønster i hvilke typer biler som besøker Oslo lufthavn Gardermoen, ble det beregnet en representativ ladeeffekt for bilene på norske veier. For å bestemme effekten trukket av bilene, ble data om hvor mye bilenes lader tillater dem å lade ganget med deres respektive markedsandel[30]. Dersom en bilmodell hadde flere forskjellige ladeeffekter, grunnet at bilen har vært gitt ut i flere varianter, ble den høyeste valgt. Deretter ble andelene summert for å finne effekten. Denne effekten ble deretter satt som den konstante effekten benyttet av alle bilene som ved P10.

For å undersøke hvor god denne tilnærmingen var, ble det laget kunstig AMS data for å sammenligne med de allerede eksisterende data. Dette ble gjort ved å gå gjennom alle ladeøktene i perioden. For hver ladeøkt legges det på en konstant effekt hver time i de kunstige AMS dataene helt til energibehovet ved den økten er oppfylt. Både den tidligere antatte effekten på $7,1kW$ og den beregnede effekten ble benyttet.

Flexibilitetspotensiale

Metodikken foreslått i [29] går ut på å undersøke hvor mye energi en elbil teoretisk sett kunne ha ladet dersom batteriets størrelse ikke hadde vært en begrensning. Den faktiske energiverdien kunne da blitt fordelt på en hvilken som helst måte innenfor denne tenkte energistørrelsen for å oppnå en ønsket effekt. Derfor kan en anslå at dette vil være bilens fleksibilitetspotensiale. Ved å beregne denne størrelsen for hver bil som lader over en periode og summere disse, kan fleksibilitetspotensialet for elbilladingen i den perioden beregnes. Dette ble gjort for alle ladeøktene mellom 21 september 2020 og 23 mars 2021. Potensialet ble sammenlignet med det faktiske energiforbruket til elbillading for samme periode.

3.4 Simulering

I [31] ble det benyttet Monte Carlo simulering for å undersøke effekten lading ved Inspira science center sin ladestasjon har på strømmettet. De benyttet seg av trafikkdata for å gjøre simuleringen av ankomster med monte carlo metoden og benyttet en skaleringsfaktor for å undersøke sensitivitet. I denne oppgaven blir samme metode benyttet å undersøke hvor stor effekt fordeling av elbillading har på det totale effektforbruket, samt hvor sensitivt det er i forhold til endring i forskjellige faktorer. Tilfeldig tall ble generert ved hjelp av random modulen i python-biblioteket Numpy.

Datagenerering

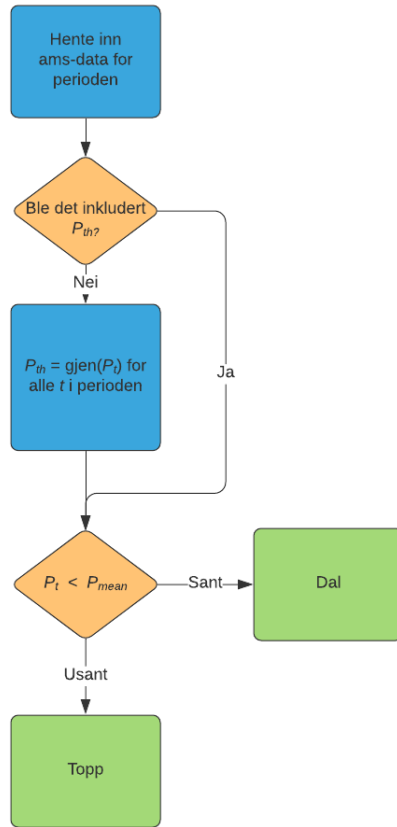
Simuleringen trekker hvor mange biler som ankommer over en tenkt uke, en starttid når bilene kobles til, hvor mye energi disse trenger og hvor lenge bilene står parkert. Ankomst av bilene hver time over en uke antas å være en tilfeldig, uavhengig variabel. Dermed kan denne tilfeldige variabelen beskrives ved hjelp av poissonfordelingen, forklart i 2.4.2, med forventet verdi lik gjennomsnittet av ankomster hver time. Energien og parkeringstiden antas også å være tilfeldige og uavhengige med forventet verdi og standardavvik gitt av gjennomsnittet av de faktiske parkeringene over hele perioden og beskrives ved normalfordeling, forklart i 2.4.2.

Ved hver simulering blir det trukket et antall ankomster for hver time. For hver av disse ankomstene trekkes et energibehov den simulerte bilen skal forsynes med. Parkeringstiden blir også trukket, med en minimumsverdi lik minstetiden det ville ta bilen å lade helt opp med den gitte effekten. Bilene blir så fordelt på to forskjellige måter over energibruken i første uken i november 2020.

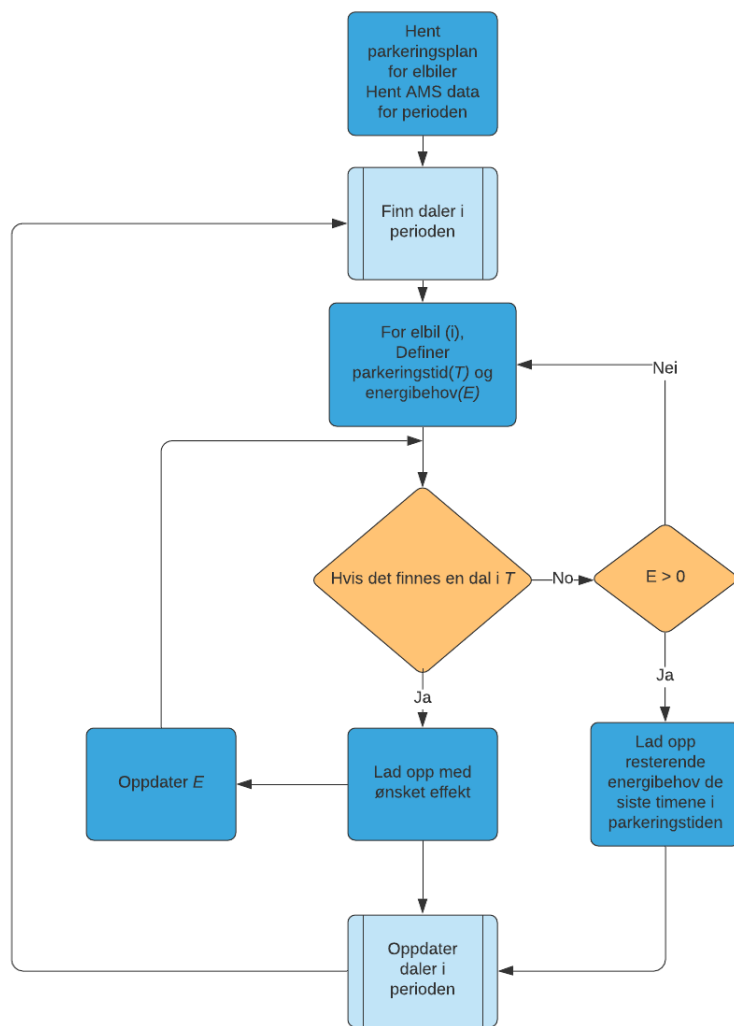
Fordeling

Den første fordelingsmetoden er lik den tidligere benyttede metoden for å undersøke hvor godt effektverdien stemte med de faktiske verdiene. Det vil si at bilene lader med konstant effekt fra de kobler til. Denne fordelingsmetoden blir heretter referert til som fordeling 1. Den andre metoden å fordele bilene på fokuserer på å fylle inn "daler", eller perioder der det er lite effektbruk. Metoden går ut ifra at lastfordelingen for den kommende uken er kjent og deler den inn i daler og topper, hvor dalene er alle tider energiforbruket er under gjennomsnittet for perioden. I figur 3.3 er det et flytskjema som forklarer hvordan dalene deles inn. Algoritmen tar en effektfordeling som input. Dersom det er ønskelig, kan det også gis ved en terskelverdi. Hvis terskelverdien ikke spesifiseres, blir denne gjennomsnittet av effektverdiene i effektfordelingen. Deretter går algoritmen gjennom hvert punkt for å sjekke om dette har en effektverdi under terskelverdien. Har den det blir dette tidspunktet markert som en dal.

Etter det vil den fordele ladeeffekten til hver ladeøkt med fokus på fylle opp dalene. Dersom det ikke er flere daler i parkeringsperioden til bilen, fordeles den resterende energien på de siste timene bilen står parkert. Heretter blir denne fordelingsmetoden referert til som fordeling 2. I figur 3.4 er et flytskjema som viser hvordan effekten fordeles på dalene. Algoritmen laster inn parkeringsplanen og effektdata for perioden som vil undersøkes. Deretter kaller den på algoritmen for å dele inn effektdata i daler. Når dette er gjort går den gjennom hver bil i parkeringsplanen og sjekker om det finnes daler i perioden bilen står parkert. Gjør det dette blir bilen planlagt å lades opp ved denne tiden. Deretter oppdateres daler i effektdata. Dersom det ikke finnes flere daler under parkeringstiden, blir det resterende effektbehovet fordelt over de siste timene i parkeringstiden.



Figur 3.3: Flytskjema for hvordan AMS-dataene blir delt inn i daler



Figur 3.4: Flytskjema for fordeling av elbillading i effekt-daler

3.4.1 Scenarier

Simuleringen kjøres 10 000 ganger og logges for begge fordelingene. For hver fordeling blir en varighetskurve funnet og gjennomsnittet og standardavvik beregnes. Disse sammenlignes så for å undersøke hvor mye en kan senke de høye lastene over en uke ved å fordele lading av bilene. For å undersøke hvor stort utslag de forskjellige verdiene har på endringen i last ble simuleringen gjort ved seks forskjellige scenarier: normal drift, høyere effekt, høyere energibehov, lavere effekt, kortere parkeringstid og flere ladeøkter.

Normal drift

Under normal drift ble alle verdiene holdt som normalt og er representativ for normal drift under perioden september 2020 til mars 2021. Denne perioden var sterkt preget av koronapandemien og er dermed ikke en god indikator for hvor godt fordeling av elbillading vil påvirke effekten under et vanlig år, og brukes derfor bare som kontroll for å se effekten av å endre på de ulike forutsetningene ved simuleringen.

Høyere ladeeffekt og energibehov

I 2.3 nevnes det hvordan utviklingen av batteriteknologi har økt energikapasiteten til elbiler i det norske markedet. Derfor er det interessant å se hvordan høyere effekt og høyere energibehov påvirker hvor godt ladefordeling senker effekttopper. For å undersøke dette ble to scenarier kjørt. Ett hvor den ladeeffekten ble satt opp til $22kW$, som er maksuttaket, og ett hvor det gjennomsnittlige energibehovet bilene trengte ble satt opp med en faktor på 1,5.

Lavere ladeeffekt

Elbilladingen på Gardermoen er enda ikke styrt for å fylle daler. Derimot vil systemet strupe hvor mye effekt bilene for tildelt dersom det trengs mer energi andre steder i bygget, eller det er for mange biler som er tilkoblet anlegget samtidig. Hvis dette skjer vil effekten bilene får utdelt først senkes til en minimumsverdi, deretter vil bilene bli satt i et køsystem. Derfor kan det være interessant å undersøke hvor stor effekt styring av ladingen med den hensikten å fylle daler dersom ladeeffekten blir satt til et lavere nivå. Dette ble gjort i et scenario der ladeeffekten ble satt ned til $3,2kW$, som er den minste effekten anlegget tilbyr.

Lavere parkeringstid

En av de store fordelene med ladingen på Gardermoen er at bilene har en veldig lang parkeringstid. Dermed har det også ofte en lang idletid og kan bidra med mye fleksibilitet. Andre næringsbygg vil ofte ha en mye lavere parkeringstid på elbilene som lader hos dem. Derfor ble det undersøkt et scenario der ladetiden senkes under simulering. Forventningsverdien til ladetiden ble satt ned til 25 % av original verdi. Dette vil da gi en indikasjon for hva andre næringsbygg kan vente seg hvis de utnytter fleksibiliteten i ladende elbiler.

Flere ladeøkter

Koronapandemien har som kjent begrenset mobilitet for de fleste nordmenn. Dette har satt sine spor på flytrafikken. Ved Oslo lufthavn Gardermoen har det vært en nedgang på 52% på passasjerer ved innlandsreiser og 77 % ved utenlandsreiser fra 2019 til 2020[32]. Dette kan man finne igjen i AMS-data fra P-10, hvor man har tall tilbake til september 2019 der en finner et effektforbruk som jevnt over er høyere en toppene ved perioden som her er undersøkt. Dermed er det naturlig å se hva som hadde skjedd dersom det var flere elbiler som ladet samtidig. For å undersøke dette ble forventningsverdien til antall ladeøkter per time skalert med en faktor på 5 og 10.

Kapittel 4

Resultat og diskusjon

Følgende kapittel gjennomgår resultatene av dataanalyse, utregning av fleksibilitetspotensiale og simulering. Kapittelet er delt tredelt med en diskusjonsdel for to første delkapitlene. Det siste delkapittelet delt i to kategorier med en diskusjonsdel for hver kategori. Kapittelet avsluttes med en generell diskusjonsdel.

4.1 Dataanalyse

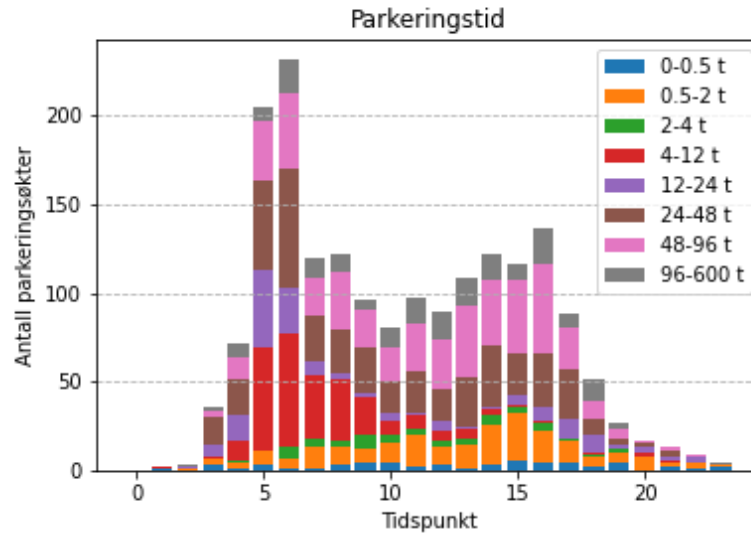
Data for parkeringstid fordelt på når i døgnet bilen ankommer er vist i figur 4.1. For hver time på døgnet er det en søyle hvor høyden tilsvarer antall biler som ankom den timen i perioden 21. september til 23. mars. Hver farge tilsvarer et intervall av parkeringstid. Ettersom idletid er en viktig faktor i hvilket potensial de parkerte elbilene har for å levere fleksibilitet, som nevnt i 3.3, vil parkeringstiden være en viktig måleparameter. Figuren viser at en stor del av bilene står parkert i godt over 24 timer. Det er også en større andel av bilene som ankommer mellom klokken fem og klokken ti om morgenen med en parkeringstid mellom fire og tolv timer.

Diskusjon

Parkeringstiden i P10 er jevnt over veldig lang. I [31] ble det beregnet en lik fordeling for biler som besøkte en ladestasjon ved Inspiria science center i Sarpsborg. Der hadde samtlige biler en parkeringstid på under ti timer uavhengig av ankomsttid.

Parkeringstid på over et døgn er gunstig dersom en skal bruke de elektriske bilene som en fleksibel last. Da kan også den etterspurte energien fordeles ut over minimum et døgn. Dette vil gjøre det mulig å velge å fordele på en måte som tar hensyn til mønstre i annet elforbruket i bygget.

Andelen biler som har en kortere parkeringsperiode, mellom fire og tolv timer, kan skyldes at enkelte ansatte eller pendlere lader bilen sin mens de er på jobb. Det vil i så fall forklare den tidlige ankomsten. Denne gruppen vil være mindre fleksibel, og mulig også mindre villig til å la ladingen av bilen deres styres.



Figur 4.1: Fordeling av parkeringstid etter ankomsttid. På den vannrette aksene er antall timer i et døgn. Hver søyle tilsvarer hvor mange ankomster det var den timen i perioden 21.september 2020 til 23.mars 2021. Hver farge tilsvarer hvilket tidsintervall bilen stod parkert.

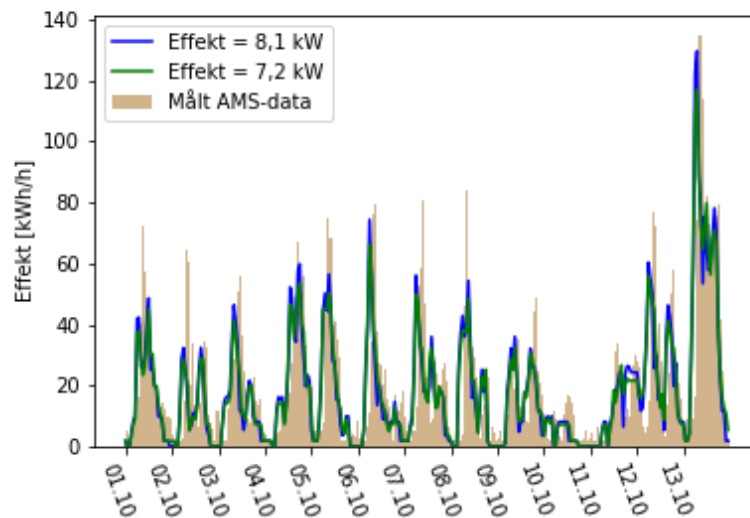
4.2 Fleksibilitetspotensiale

4.2.1 Ladeeffekt

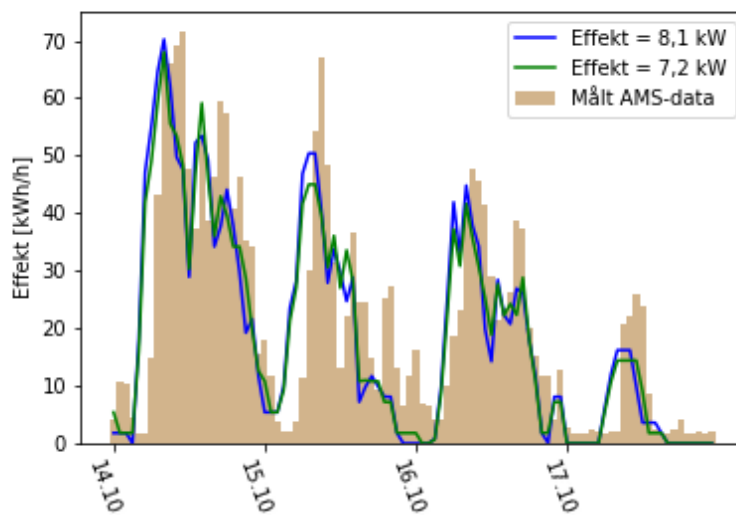
For å undersøke selve fleksibilitetspotensialet må en først anta en ladeeffekt som bilene lader med. Etter å ha vektet 24 elbiler etter sin respektive markedsandel og summert ladeeffektene, ble en representativ ladeeffekt på $8,1kW$ beregnet. Denne effekten, sammen med den tidligere antatte effekten på $7,1kW$, ble deretter sammenlignet med de målte AMS-dataene fra fordelingsskapet. Resultatet vises i figur 4.2. Figuren viser AMS-data fra perioden 1. til 14. oktober. Den estimerte effektbruken ved de forskjellige ladeeffektene er tegnet i blå og grønn linje. Den estimerte ladeeffekten følger det som ble målt tatt ut godt, utenom et par høye effekttopper.

I figur 4.3 vises en kortere periode. Fra figuren ser man at den estimerte ladeeffekten følger de målte dataene godt, men er forskjøvet fremover i tid. Effektkurve til den beregnede effekten på $8,1kW$ ser ut til å være mer i samsvar med de målte dataene, enn den tidligere antatte effekten på $7,2kW$.

Heretter blir all ladeeffekt satt til å være lik $8.1kW$, om ikke annet er opplyst.



Figur 4.2: Målt effektforbruk sammenlignet med estimert effektbruk for ladeeffekter 7,2kW og 8,1kW. De grå søylene tilsvarer det målte effektforbruket til elbillading ved parkeringshuset P10 fra 1. til 18. oktober 2020. Den blå og den grønne linjen viser det estimerte effektforbruket til elbillading med konstant ladeeffekt på henholdsvis 7,2kW og 8,1kW.



Figur 4.3: Målt effektforbruk sammenlignet med estimert effektbruk for ladeeffekter 7,2kW og 8,1kW. De grå søylene tilsvarer det målte effektforbruket til elbillading ved parkeringshuset P10 fra 14. til 18. oktober 2020. Den blå og den grønne linjen viser det estimerte effektforbruket til elbillading med konstant ladeeffekt på henholdsvis 7,2kW og 8,1kW.

Diskusjon

Både den antatte og beregnede ladeeffekten er godt under maksimalverdien for ladepunktene i P10. Dette kommer av at det er få biler med lader som støtter en så høy effekt under lading, som vist i 2.2. Dermed vil de heller ikke forklare de høye toppene, som trolig skyldes lading av elbiler som kan utnytte den tilgjengelige ladekapasiteten fullt ut.

Årsaken til forskyvningen forover i tid, er begrunnet i antagelsen om at elbilene lader med full effekt fra tilkobling. I realiteten tar det tid før ladingen kommer opp til sin fulle effekt. Antagelsen om at bilene lader med konstant effekt er heller ikke helt korrekt. I 2.2.1 forklares hvordan litium-ion batterier lades, og det innebærer at enten strøm eller spenning alltid vil endre seg. Dette blir korrigert for med å sette full ladeeffekt til 80% av den etterspurte energien er ladet, for å så sette ned ladeeffekten til $3,2\text{kW}$.

Energiforbruket til selve ladepunktene blir ikke tatt hensyn til. Hvert ladepunkt vil trekke strøm, enten den lader en bil eller står i "standby". Dette vil legge seg oppå det som måles av AMS-måleren til elbillading. Denne effekten anses som liten, men vil gjøre at det blir en ytterligere forskjell mellom det estimerte og det målte effektforbruket.

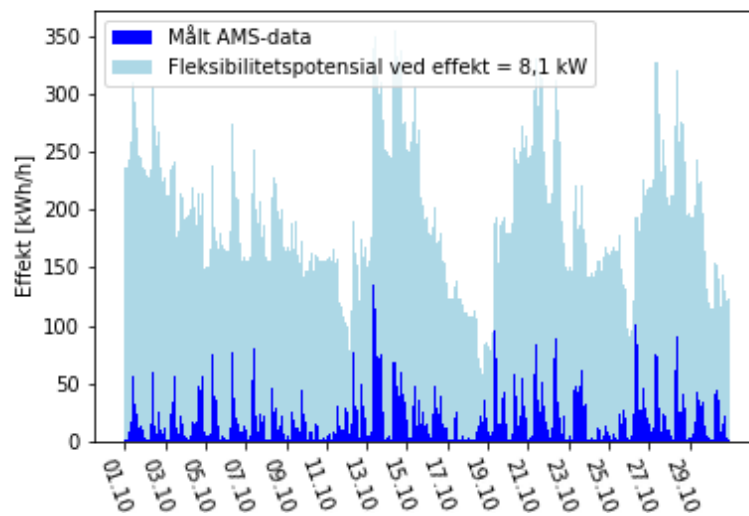
Den estimerte ladeeffekten er kun basert på batteridrevne elektriske biler, og tar dermed ikke med ladbar hybrider i sin beregning. Dette er gjort ettersom de har en lavere markedsandel enn sin helelektriske motpart, som vist i 2.3. De utgjør likevel en betydelig andel og det er sannsynlig at flere av bilene som lader ved P10 vil være ladbare hybrider. Dette vil gjøre at den beregnede ladeeffekten kunne vært høyere eller lavere dersom ladbare hybrider ble inkludert i beregningen.

Likevel beskriver den beregnede effekten de målte dataene relativt godt. I figur 4.3 er perioden som er tatt med onsdag til fredag. Her ser vi tydelig at midt i uken når det er en større pågang, vil antagelsen om konstant effekt ikke være så dårlig. Dette er mulig grunnet at ladeøkter som har en lavere effekt jevnes ut av økter med høyere effekt og vice versa. Når man kommer til helgen derimot og det er færre økter, vil unøyaktigheten ved hver enkelt økt telle mer og antagelsen stemmer ikke like bra.

4.2.2 Fleksibilitetspotensiale

Fleksibilitetspotensialet som produkt av ildetid og antatt effekt er vist i figur 4.4. Figuren viser potensialet for oktober måned 2020, hvor de mørkeblå søylene er det faktisk målte AMS-data for elbillading ved bygget, og de lyseblå søylene er det estimerte fleksibilitetspotensialet for elbilladingen. Bunnen av de lyseblå søylene er satt til toppen av de mørkeblå søylene. Grunnen til dette er for å illustrere hvor mye effekt som teoretisk sett kunne vært trukket på et gitt tidspunkt. Dette hadde da blitt summen av de to søylene.

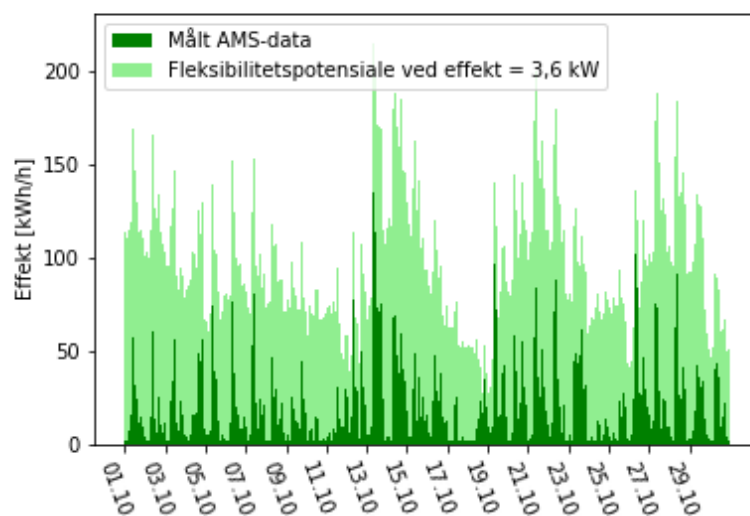
På figuren ser man tydelig at det er et høyere potensiale i dagene etter ukedagene, mens like etter helgen er det en nedgang. Fleksibilitetspotensialet er likevel høyt over hele måneden og ofte flere ganger større en den effekten som faktisk ble trukket ved det gitte tidspunktet.



Figur 4.4: Estimert fleksibilitetspotensiale for oktober måned 2020. De blå søylene tilsvarer det målte forbruket til elbillading ved parkeringshus P10 over hele måneden per time. De lyseblå søylene er det estimerte fleksibilitetspotensialet ved en ladeeffekt på 8,1kW, og begynner på toppen av de blå søylene. Fleksibilitetspotensialet tilsvarer den tenkte effekten som kunne vært flyttet til den gitte timen fra andre ladeøker.

Lavere ladeeffekt

Fleksibilitetspotensialet for oktober dersom ladeeffekt var satt til 3.6 kW er vist i figur 4.5. Her er de grønne søylene det målte effektforbruket i perioden, og de lysegrønne søylene effektspotensialet. Det er tydelig redusert i forhold til potensialet vist i figur 4.4. Figurene illustrerer hvordan forskjellig ladeeffekt påvirker fleksibilitetspotensialet.



Figur 4.5: Estimert fleksibilitetspotensiale for oktober måned 2020. De grønne søylene tilsvarer det målte forbruket til elbillading ved parkeringshus P10 over hele måneden per time. De lysegrønne søylene er det estimerte fleksibilitetspotensialet ved en ladeeffekt på $3,6 \text{ kW}$, og begynner på toppen av de blå søylene. Fleksibilitetspotensialet tilsvarer den tenkte effekten som kunne vært flyttet til den gitte timen fra andre ladeøkter.

Diskusjon

Fleksibilitetspotensialet er et produkt av ladeeffekt og idletid. Den lange parkeringstiden vist i 4.1 gir en lang idletid og dermed også et stort fleksibilitetspotensial. Ladeeffekten har også en stor påvirkning på potensialet. Som diskutert i 4.2.1 er den beregnede ladeeffekten ikke alltid et like godt estimat på den virkelige effekten. I tillegg vil den ikke være konstant under hele ladeperioden. Dette vil føre til at det faktiske fleksibilitetspotensialet er lavere enn det som vises i 4.4.

I tillegg til dette vil potensialet bare være realiserbart dersom man kjenner parkeringstiden og den etterspurte energien til bilene som kommer på forhånd. Eierne av bilen må også godta at opplading av bilen styres og kan legges for eksempel mot slutten av parkeringsoppholdet. Dermed blir bilen mindre tilgjengelig for eieren dersom de av en eller annen grunn må ende parkeringsoppholdet tidlig. Siden Oslo lufthavn Gardermoen er en flyplass, vil dette trolig være et mindre problem gitt at de som parkerer der reiser av gårde med fly og ikke er i nærheten av bilen uansett.

4.3 Simulering

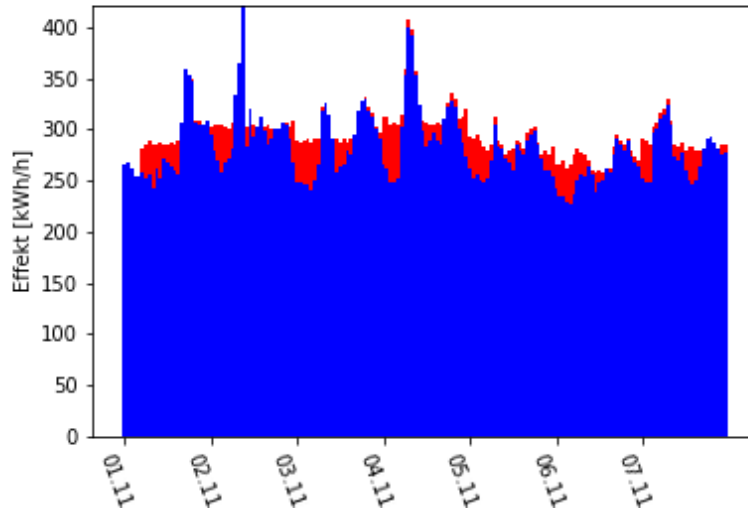
I denne delen vil resultatene av simuleringen bli presentert. Scenarioene presenteres gjennom to kategorier. Først kommer scenarioene der det forventede antallet biler som ankommer holdes konstant, mens forutsetninger som ladeeffekt og parkeringstid endres. Disse scenarioene tar for seg parkeringsplassen slik den har vært under koronapandemien. Den neste kategorien er scenarier der det forventede antallet ankomster endres. Disse scenarioene skal simulere hvordan parkeringen kan være når drift vil endre seg etter pandemien. For hver kategori vil det følge en diskusjonsdel. Til slutt kommer en generell diskusjonsdel for simuleringen.

4.3.1 Scenarier med konstant ankomst

Normal drift

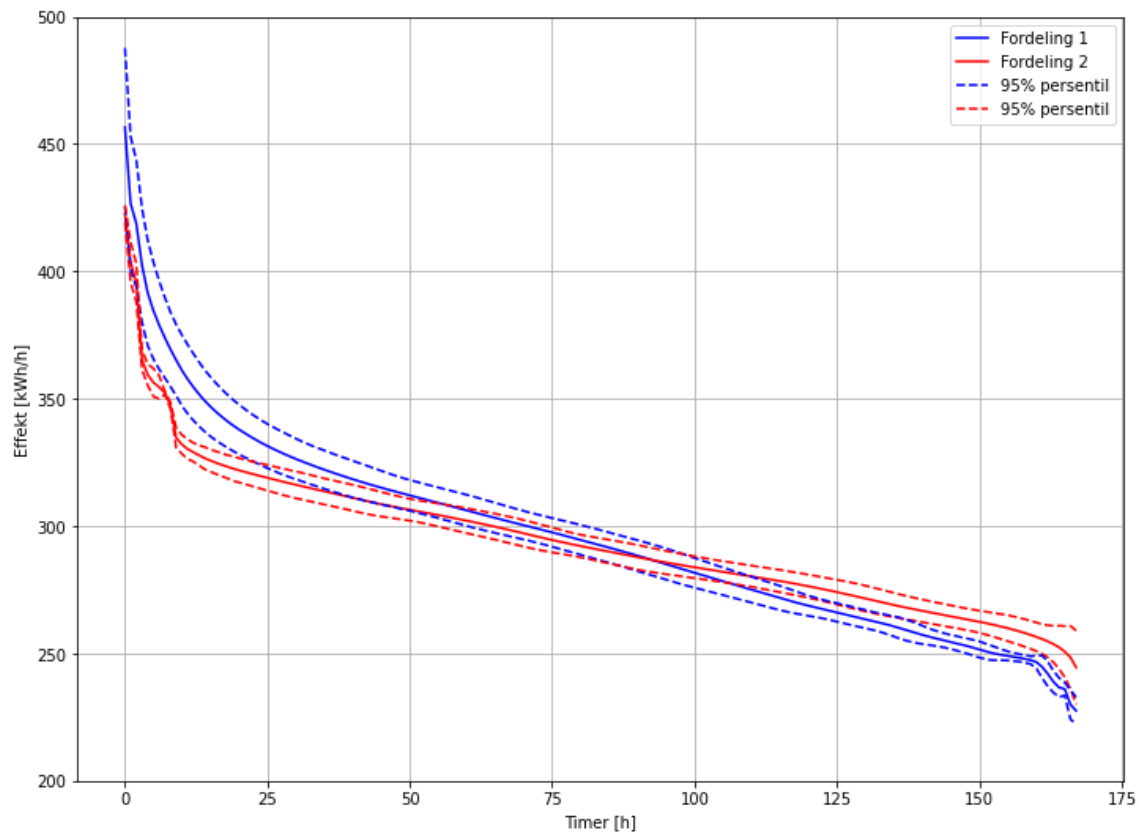
I scenariet kalt normal drift er alle forutsetninger hentet fra data fra parkeringshuset P10 på Gardermoen, samt den beregnede ladeeffekten på $8.1kW$. Ett eksempel på simulering med fordeling 2 vises i figur 4.6. Her er de blå søylene AMS-data fra annet elektrisk forbruk i parkeringshuset P10 i perioden 1. til 7. november 2020. Dette vil være lik for alle scenarioene. De røde søylene er den elektriske effekten som går til elbillading ved fordeling 2. Under normal drift ser man at den fordeler seg godt i de forskjellige dalene. Dette er typisk for scenarioene med den samme mengden ankomster.

I snitt for disse simuleringene er det totalt 70 ladeøkter over hele uken. Av disse vil maksimalt 50 ha overlappende parkeringstid, altså vil det maksimalt stå 50 biler på parkeringsplassen på samme tid. Det gjennomsnittlige energibehovet per bil er på $32,4kWh$ og den gjennomsnittlige parkeringstiden er på 43,3 timer.



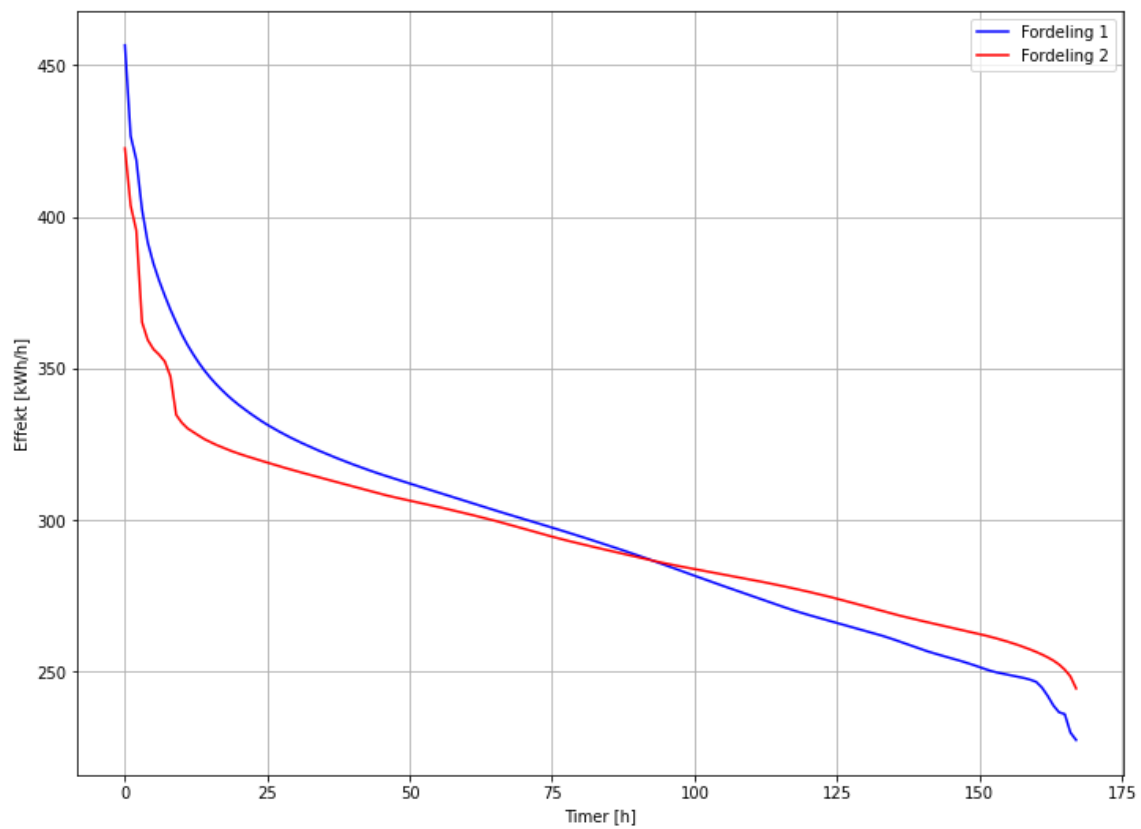
Figur 4.6: Simulert effektforbruk ved fordeling 2 under normal drift. De blå søylene tilsvarer det faktiske forbruket fra det øvrige elforbruket på P10 fra 1. til 7. november 2020 per time. De røde søylene representerer effektforbruket fra de simulerte bilene som parkerte i denne perioden, dersom ladingen deres ble styrt med fordeling 2.

For å sammenligne de forskjellige scenarioene blir varighetskurver tatt i bruk. Varighetskurven viser hvor mange timer av en periode det trekkes en gitt effekt. For scenariet med normal drift er varighetskurven for normal drift vist i figur 4.7. Her er den blå linjen gjennomsnittsverdien for simuleringene med fordeling 1. Den røde kurven er gjennomsnittsverdien for simuleringen med fordelingen 2. Ettersom Monte Carlo simulering er en probabilistisk simulering metode gir den et spenn av utfall som i sin tur er en fordeling av hvilke utfall en kan vente seg av simuleringen. Derfor er 95% presentilen for både fordeling 1 og fordeling 2 plottet som stiplede kurver. Dette kan leses som at utfallet av simuleringen 95% av tiden vil befinne seg innenfor disse to linjene.

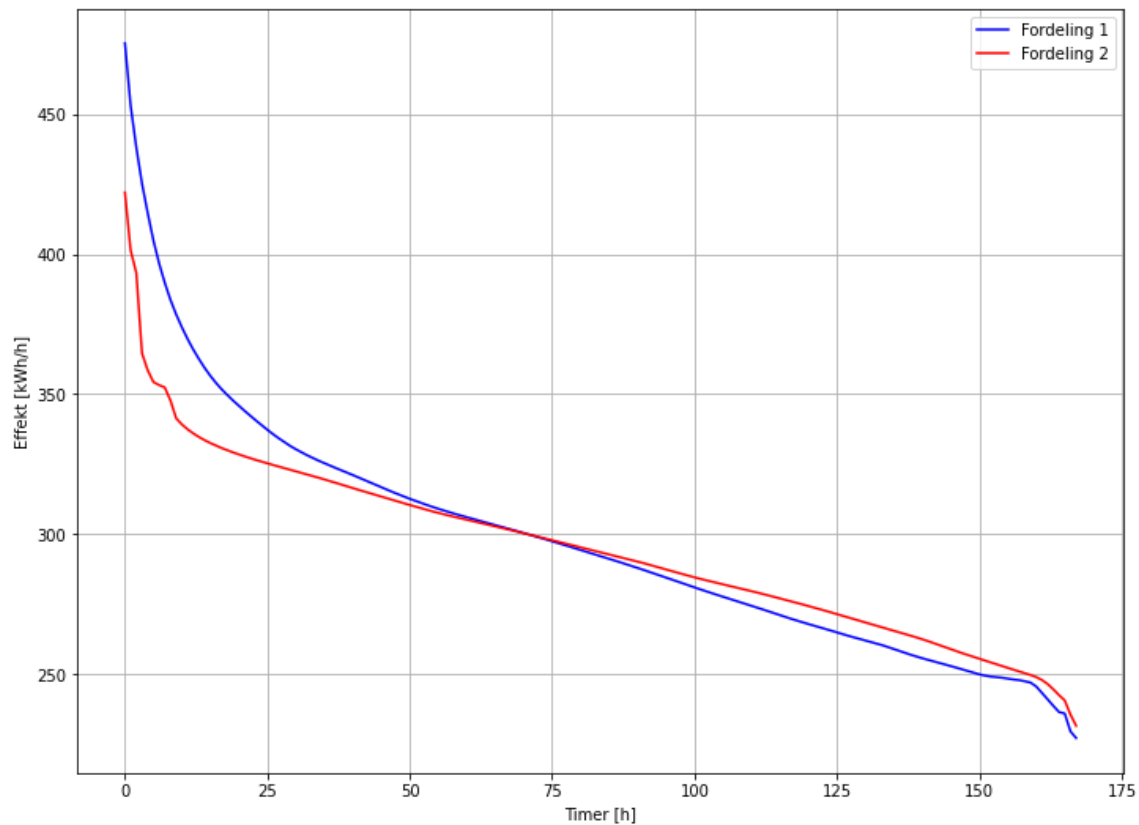


Figur 4.7: Varighetskurve for det totale simulerte effektforbruket på P10 per time, under normal drift. Den heltrukkene linjen tilsvarer gjennomsnittsverdien og de stiplede linjene tilsvarer 95% persentilen for effektforbruket for hver av de to fordelingene. Blå farge tilsvarer fordeling 1, mens rød tilsvarer fordeling 2.

I figur 4.8 vises kun gjennomsnittsverdiene for simuleringen av vanlig drift. Dette for å lettere kunne sammenligne de forskjellige scenarioene. Heretter vil kun plot av gjennomsnittsverdiene av simuleringene bli presentert. Alle plot med 95% persentil finnes i vedlegg A.



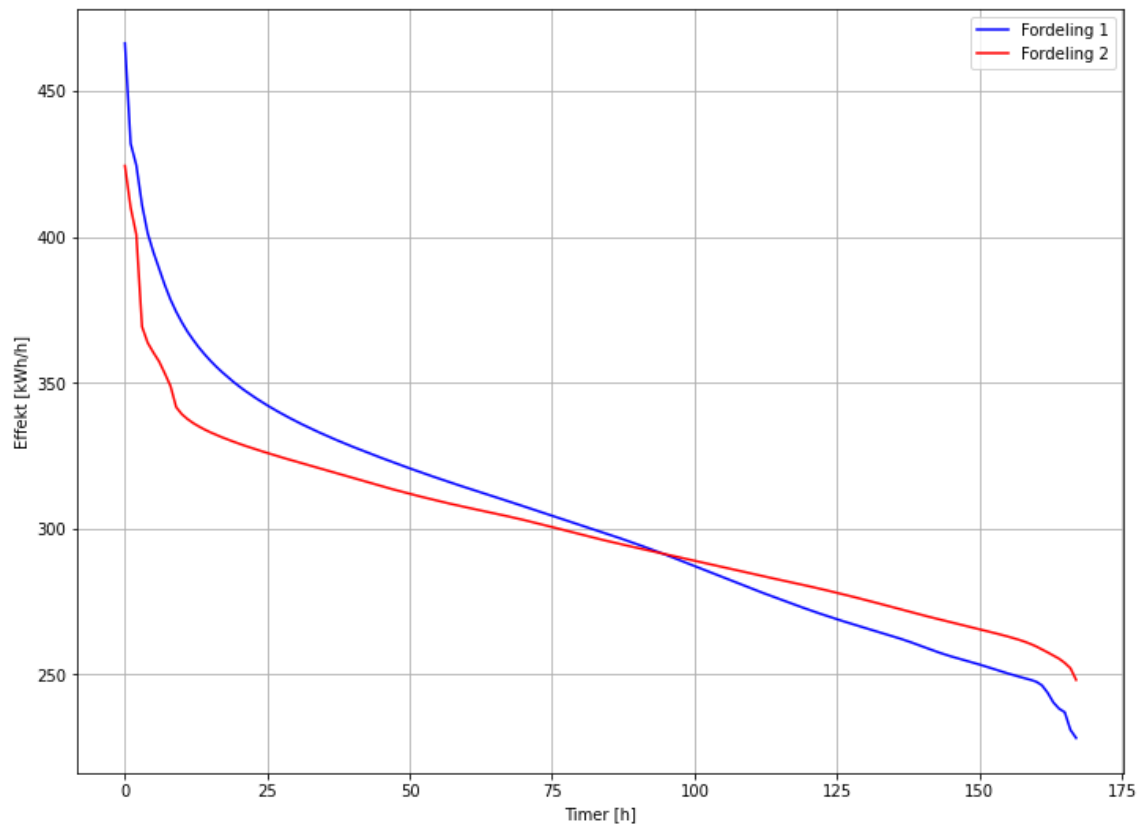
Figur 4.8: Varighetskurve for det totale simulerte effektforbruket på P10 per time, under normal drift. Hver linje tilsvarer gjennomsnittsverdiene av resultatene fra simuleringen. Blå linje tilsvarer fordeling 1, mens rød linje tilsvarer fordeling 2.



Figur 4.9: Varighetskurve for det totale simulerte effektforbruket på P10 per time, ved en ladeeffekt på 22kW. Hver linje tilsvarer gjennomsnittsverdiene av resultatene fra simuleringen. Blå linje tilsvarer fordeling 1, mens rød linje tilsvarer fordeling 2.

Høyere ladeeffekt

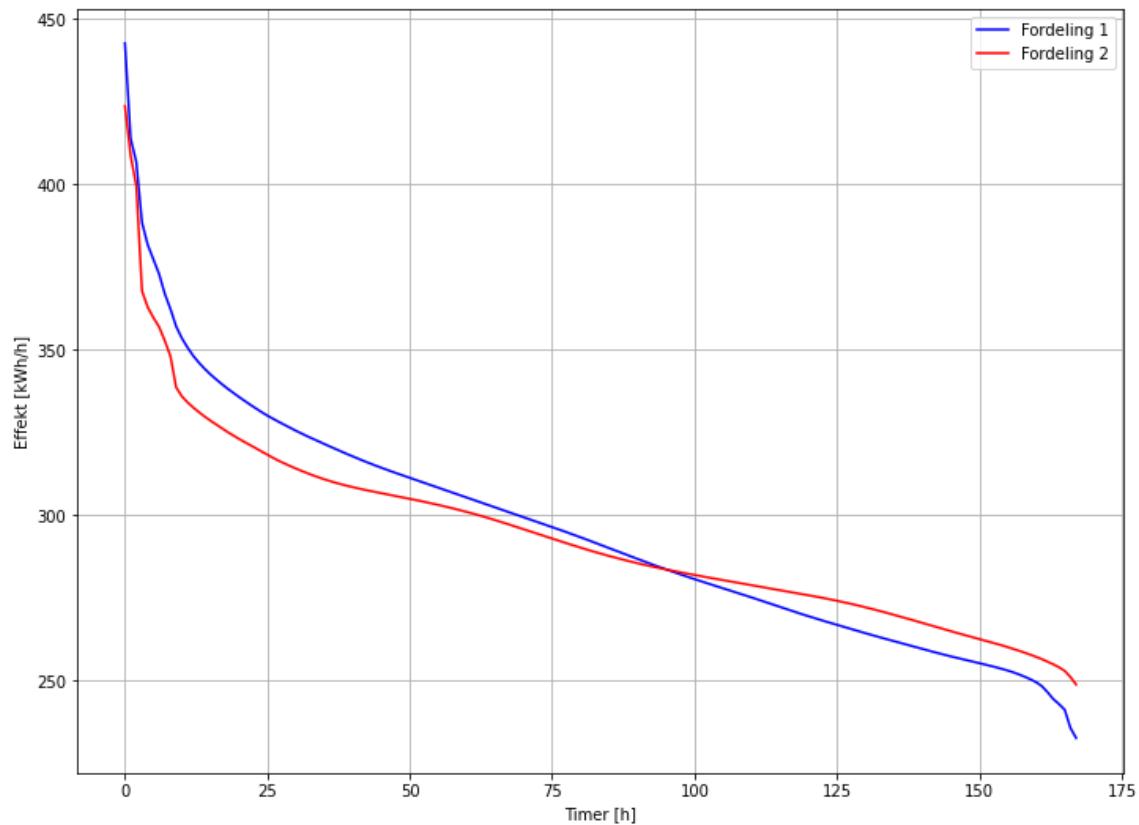
Ved høyere effekt ble effekten satt til maksimaleffekten på 22kW. Resultatet finnes i figur 4.9. Kurven har en høyere topp for fordeling 1 enn ved normal drift. Krysningepunktet der de forskjellige fordelingene møtes er også forskjøvet til venstre i forhold til normal drift. Dette vil si at det jevnt over vil være flere timer med høy effekt dersom ladeeffekten settes opp.



Figur 4.10: Varighetskurve for det totale simulerte effektforbruket på P10 per time, ved et høyere energibehov. Hver linje tilsvarer gjennomsnittsverdiene av resultatene fra simuleringen. Blå linje tilsvarer fordeling 1, mens rød linje tilsvarer fordeling 2.

Høyere energibehov

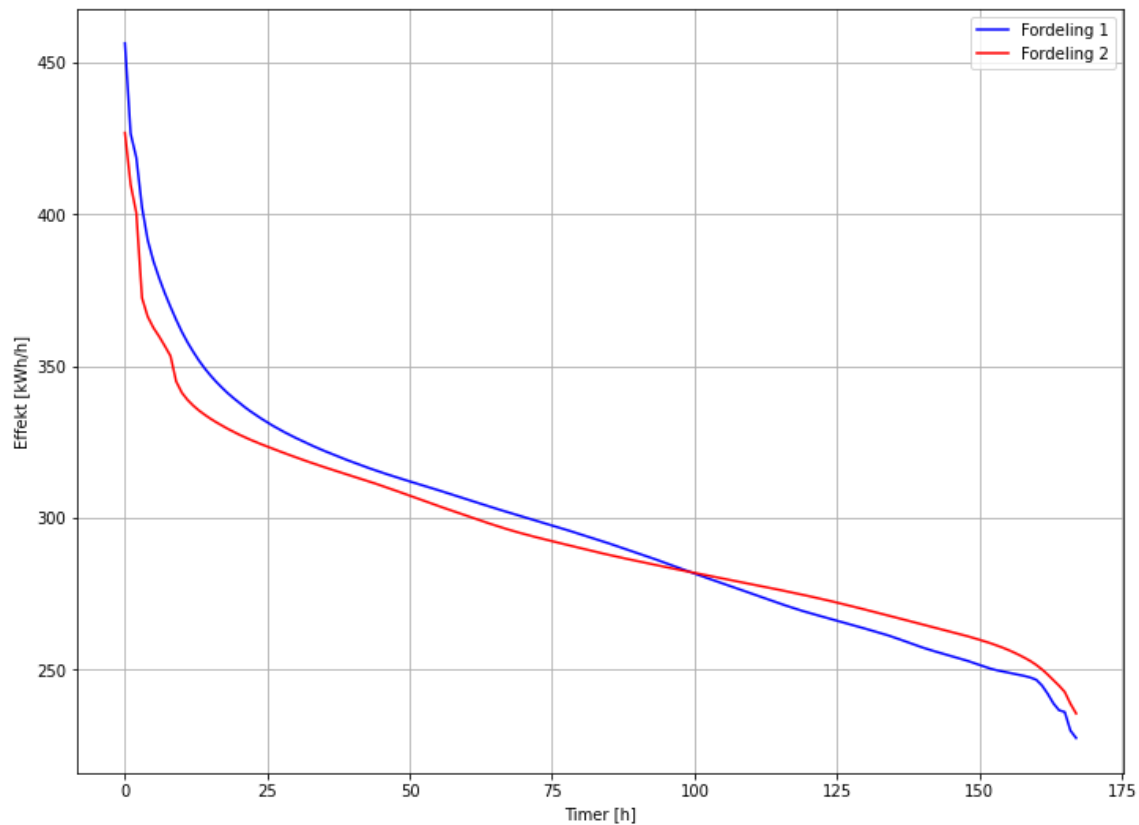
Under scenariet høyere energibehov ble forventningsverdien til hvor mye energi bilene ville lade økt med 50%. Dette øker det gjennomsnittlige energibehovet til 47,1 kWh. Resultatet vises i figur 4.10. Ved høyere energibehov løftes kurvene med fordeling 1 og fordeling 2 seg oppover i forhold til normal drift. Formen på kurvene er relativt like, utenom at kurven til fordeling 1 er litt brattere, og krysningspunktet mellom kurvene er på samme sted.



Figur 4.11: Varighetskurve for det totale simulerte effektforbruket på P10 per time, ved en ladeeffekt på 3.2kW. Hver linje tilsvarer gjennomsnittsverdiene av resultatene fra simuleringen. Blå linje tilsvarer fordeling 1, mens rød linje tilsvarer fordeling 2.

Lavere ladeeffekt

Ved lavere effekt ble den konstante effekten satt til 3.2kW. Resultatet vises i figur 4.11. I forhold til normal drift, er begge kurvene forskjøvet nedover. Det vil si at effektbruket over hele perioden forminskes. Kurvene ligger også nærmere hverandre enn de under normal drift, som betyr at fordeling 2 er en mindre effektiv metode for å senke effekttopper med lavere ladeeffekt.



Figur 4.12: Varighetskurve for det totale simulerte effektforbruket på P10 per time, ved en kortere parkeringstid. Hver linje tilsvare gjennomsnittsverdiene av resultatene fra simuleringen. Blå linje tilsvare fordeling 1, mens rød linje tilsvare fordeling 2.

Lavere parkeringstid

For scenariet med lavere parkeringstid ble effekten av å sette ned den forventede parkeringstiden til 25% av den gjennomsnittlige parkeringstiden for hver time. Dette senker den gjennomsnittlige parkeringstiden til 10,9 timer. Resultatet av simuleringen vises i figurer 4.12. Her er forskjellen mellom kurvene til fordeling 1 og fordeling 2 blitt tydelig mindre.

Diskusjon

Over er det presentert fem forskjellige scenarier for forskjellige konfigurasjoner av faktorer som styrer effektforbruket til elbillading over en uke. Felles for alle scenarioene er at den forventede verdien av ankomster er den samme. Ved denne forventede verdien vil det ikke være flere enn 70 biler som ankommer over en uke. Ettersom flere av disse bilene også drar, blir det ganske enkelt å fordele effekten som etterspørres på de tidspunktene hvor annet elektrisk forbruk på bygget er lavt. Derfor settes den høyeste effekttoppen av det andre elektriske forbruket på bygget, som i denne simuleringen holdes fast. Toppen av varighetskurven for fordeling 2 er dermed ikke spesielt interessant å sammenligne for de forskjellige scenarioene.

Forskjellene mellom varighetskurvene fra de forskjellige scenarioene er små og ligger litt unna toppen. Ved en høyere ladeeffekt krysser kurvene hverandre lengre mot venstre i forhold til under normal drift. Dette betyr at det er færre timer hvor effekten blir senket ved fordeling 2, enn ved normal drift. Her kan en også merke seg at toppen av kurven ligger høyere enn for de andre scenarioene. Den høyere ladeeffekten gjør at dersom lading skjer uten styring, som i fordeling 1, blir toppene gjerne høyere. Til gjengjeld blir energibehovet fylt opp raskere, og derfor vil det kreve færre timer å lade opp elbilene. Dette betyr at det er mer å hente med å lade med fordeling 2 i forhold til normal drift på de timene med mest effekt, mens det tidligere blir lavere effekt under fordeling 1.

Ved det høyere effektbehovet er begge kurvene forskjøvet oppover i forhold til normal drift. Dette er ikke spesielt overraskende ettersom arealet under varighetskurven vil tilsvare energien som er avgitt, og dermed må denne være større ettersom etterspørselen stiger. Siden toppen av kurven til fordeling 2 er styrt av det fastsatte elektriske forbruket på resten av bygget, blir det en større forskjell på fordeling 1 og 2 enn ved normal drift. Det at kurven forskyves oppover vil bety at hele effektforbruket økes, og dermed vil det være en bedre ide å styre elbilladingen.

Når ladeeffekten settes ned til $3,2kW$ ser vi at effekttoppen senkes for fordeling 1. Dette kommer av at det som blir lagt på den allerede høyeste toppen blir mindre. I tillegg ser vi at det blir mindre å hente fra fordeling 2, ettersom kurvene ligger nærmere hverandre enn under normal drift. Ved en lavere ladeeffekt synker også fleksibilitetspotensialet, som vist i 4.2.2. Dermed blir det et utslag under fordelingen.

Det samme skjer ved en lavere ladetid. Ettersom fleksibilitetspotensialet er gitt av idletid, som direkte har sammenheng med parkeringstiden, synker det også i dette scenariet. I forhold til scenariet med lavere ladeeffekt, vil fordeling 2 ha mindre effekt ved en senkning av den forventede ladetiden til 25% enn ved senkning av ladeeffekten til $3,2kW$.

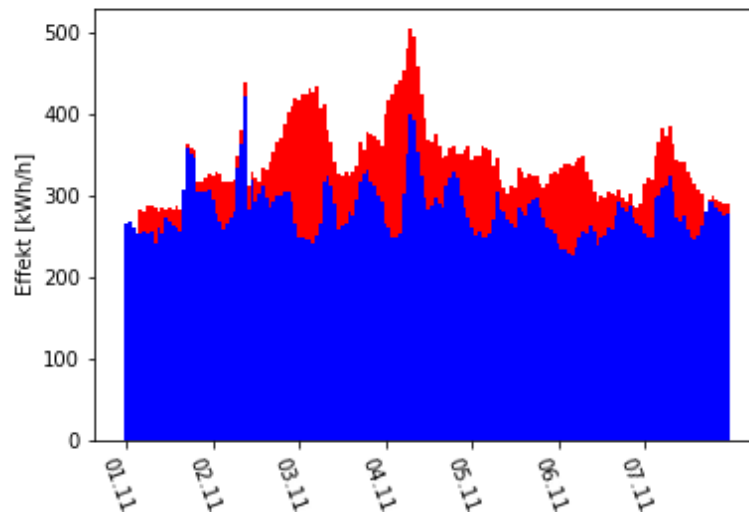
Det er vanskelig å vurdere hvorvidt man vil se påvirkning av en eller flere av de analyserte faktorene etter koronapandemien. Siden anlegget i P10 allerede nå styrer ladingen av elbilene dersom det er for mange som lader samtidig, er ikke scenariet hvor effekten skrur ned til $3,2\text{kW}$ spesielt usannsynlig, men krever at det kommer en del biler på samme tid. Utvikling i elbiler vil føre til at det både kommer biler med større energibehov og som kan utnytte den effekten som er tilgjengelig, som nevnt i 2.3. At alle bilene som kommer vil kunne utnytte effekten på 22kW er ikke helt sannsynlig, men det vil bli generelt mer lading på høyere effekt.

At bilene skal stå der kortere er ikke helt sannsynlig, men kan bli tilfelle dersom flere benytter seg av å fly til dagpendling eller møter. Ettersom innenlandsreiser har gått ned med 50% siden 2019, kan det være tenkelig at flere av disse ville bidra til kortere parkeringstid i snitt. Utenlandsreiser har derimot sunket enda mer, hele 70% siden 2019. Det er også mulig at om disse reisene tar seg opp igjen og vil føre til en lengre parkeringstid i snitt, ettersom disse reisene gjerne vil være over en lengre periode.

4.3.2 Scenarier med flere ankomster

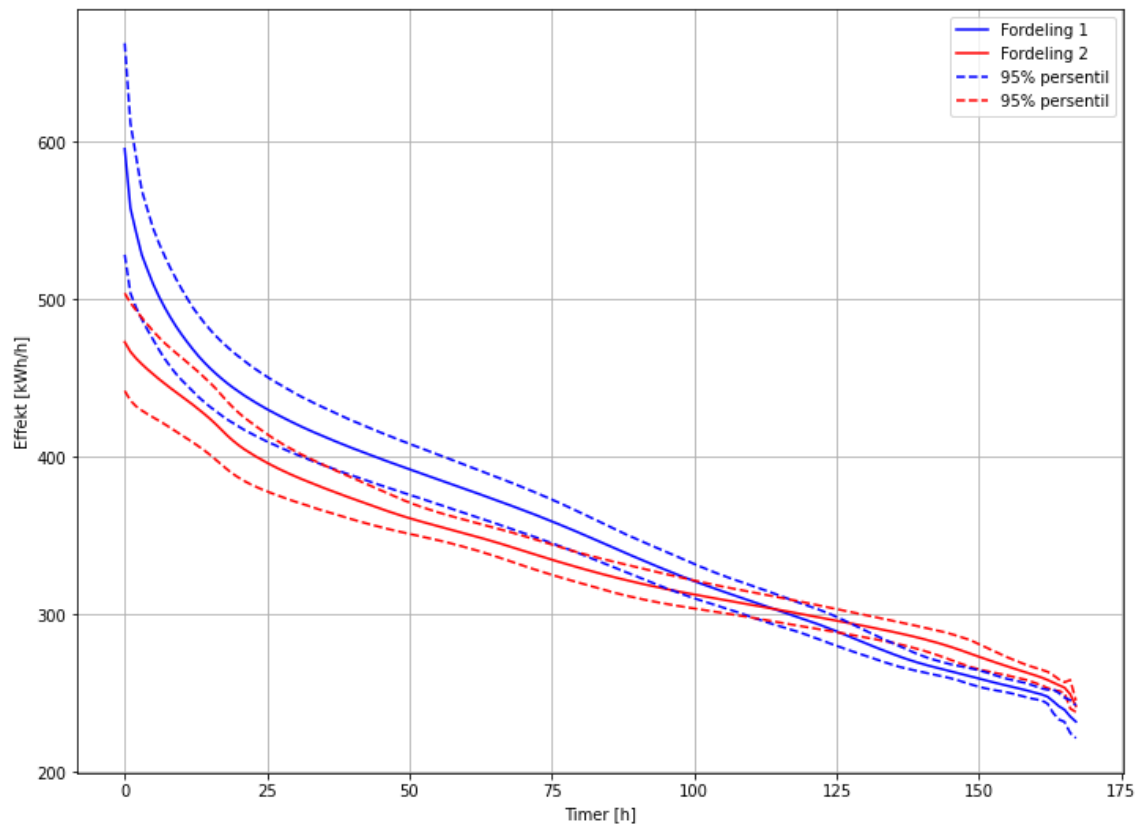
Dette scenariet ble simulert to ganger. Den første gangen ble den forventede verdien for ankomster hver time skalert med en faktor på 5. Den andre gangen ble denne faktoren satt til 10.

Faktor: 5



Figur 4.13: Simulert effektforbruk ved fordeling 2 ved antall forventede ladeøkter skalert med faktor 5. De blå søylene tilsvarer det faktiske forbruket fra det øvrige elforbruket på P10 fra 1. til 7. november 2020 per time. De røde søylene representerer effektforbruket fra de simulerte bilene som parkerte i denne perioden, dersom ladingen deres ble styrt med fordeling 2.

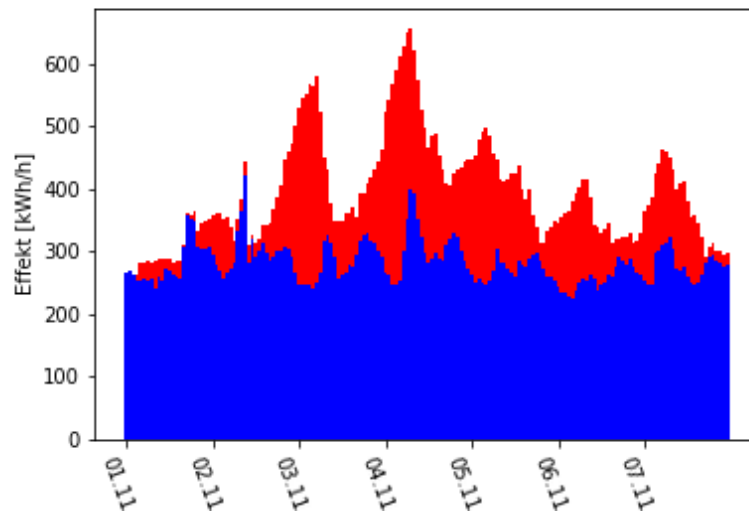
I figur 4.13 er det presentert et utfall av simuleringen med høyere antall ankomster skalert med faktor fem, ved fordeling 2. Under denne simuleringen var gjennomsnittlig antall økter per uke 353. Det maksimale antall økter som delte parkeringstid var 161. Den simulerte elbilladingen blir i dette tilfellet større enn i de tidligere scenarioene. Det er også en opphopning ved enkelte deler av dagen. Dette skyldes valget om å fordele energibehovet ved slutten av ladeperioden dersom det ikke er flere daler igjen under perioden.



Figur 4.14: Varighetskurve for det totale simulerte effektforbruket på P10 per time, ved antall forventede ladeøkter skalert med faktor 5. Den heltrukkene linjen tilsvarer gjennomsnittsverdien og de stiplede linjene tilsvarer 95% persentilen for effektforbruket for hver av de to fordelingene. Blå farge tilsvarer fordeling 1, mens rød tilsvarer fordeling 2.

Varighetskurven med persentiler vises i figur 4.14. Her er det tydelig en gevinst ved å benytte fordeling 2, men flere ladeøkter har bidratt til å øke usikkerheten i resultatet av simuleringen. Fra figuren ser man det er en stor overlapp mellom 95% persentilen til fordeling 1 og fordeling 2.

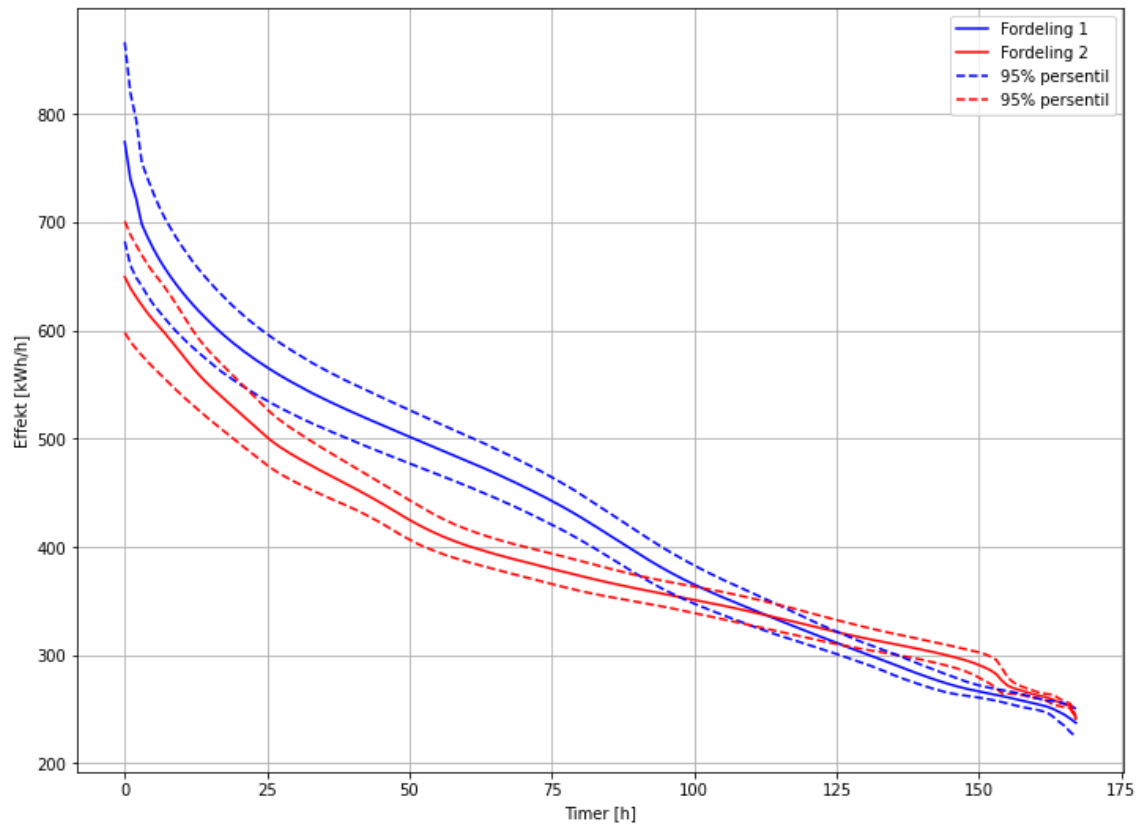
Faktor 10



Figur 4.15: Simulert effektforbruk ved fordeling 2 ved antall forventede ladeøkter skalert med faktor 10. De blå søylene tilsvarer det faktiske forbruket fra det øvrige elforbruket på P10 fra 1. til 7. november 2020 per time. De røde søylene representerer effektforbruket fra de simulerte bilene som parkerte i denne perioden, dersom ladingen deres ble styrt med fordeling 2.

Ved en faktor på 10 blir et utfall av simuleringen sendt ut som i figur 4.15. Den tidligere nevnte effekten fra scenariet med faktor 5, har bidratt til å lage ganske store effekttopper. I dette scenariet øker gjennomsnittlige antall økter til 705 per uke. Maksimalt antall ladeøkter med overlappende parkeringstid øker til 270.

I varighetskurven til scenariet med faktor 10, vist i figur 4.16, ser vi at det er en større overlapp mellom de to fordelingsmetodene ved de høye effektene. Kurven til fordeling 1 er slakere i begynnelsen sammenlignet med scenariet med faktor 5.



Figur 4.16: Varighetskurve for det totale simulerte effektforbruket på P10 per time, ved antall forventede ladeøkter skalert med faktor 10. Den heltrukkene linjen tilsvarer gjennomsnittsverdien og de stiplede linjene tilsvarer 95% persentilen for effektforbruket for hver av de to fordelingene. Blå farge tilsvarer fordeling 1, mens rød tilsvarer fordeling 2.

Diskusjon

Det er åpenbart en svakhet i metoden brukt for fordeling 2. Når antall økter øker, øker energibehovet og de dalene som finnes i en tidsperiode fylles raskt opp. Deretter gjør valget om å fokusere opplading på senere i perioden at det blir store topper der de fleste av parkeringsøktene starter. Dette blir videre forsterket av at den forventede ankomsten er funnet fra en periode med relativt få besøkende. Dermed blir det stor forskjell mellom hvilken forventet verdi er et for hver time. Ved enkelte tidspunkt er den forventede verdien lik null. Når de forventede verdiene så skaleres blir forskjellene forstørret og det blir lite spredning i når bilene blir forventet å ankomme. Parkeringstiden er gitt av en normalfordeling med forventningsverdi basert på de faktiske ankomstene i datasettet. Siden det blir en opphopning av ankomster ved samme starttid, trekkes mange av parkeringstidene med samme forventningsverdi. Dermed blir det en opphopning av effekt på slutten av parkeringsoppholdet, i stedet for i begynnelsen av oppholdet som i fordeling 1.

Likevel ser man av 4.14 og 4.16 at å styre ladingen med fordeling 2 vil føre til forminskning av effekttopper. Selv om det er overlapp i de sannsynlige utfallene for de to fordelingene, vise gjennomsnittsverdiene at de høyeste effektene på bygget blir redusert betraktelig. Dette vil føre til en jevnere effektkurve og i det tilfelle dette korresponderer med den dimensjonerende timen på hele anlegget, vil det bidra til kostnadsreduisering for alt annet effektforbruk.

4.4 Generell diskusjon

Datagrunnlag

Datagrunnlaget er ladeøkter og AMS-data i perioden 21. september 2020 til 23. mars 2021. Dette er en relativt kort periode og har i hovedsak kun måneder fra vinterhalvåret. Dermed vil trender som kan forekomme under sommertid ikke tas med i beregningene. I tillegg til dette, har som nevnt koronapandemien bidratt til å begrense antall reisende betraktelig. Når restriksjonene som følge av pandemien blir hevet vil trafikk sannsynligvis øke. Datagrunnlaget forteller ingenting om hvordan fordelingen av parkering eller forbruket til elbillading vil være når pandemien er over.

Effekt

Som nevnt tidligere er ikke effekten konstant. For å kompensere for dette blir effekten satt ned etter at 80% av energien er ladet opp. Dette vil imitere den lave ladeeffekten elbiler vil lade ved når SoC i batteriene er høy, grunnet den lave strømmen som kreves som vist i 2.2.1. Dette blir ikke helt korrekt ettersom den energien bilen lader ikke nødvendigvis tilsvarer SoC til batteriet. Dermed kan det være at i virkeligheten vil den lave effekten begynne tidligere enn under estimeringen og simuleringen i denne oppgaven. I så fall vil det føre til at det vil være en mindre effekt av å styre elbilladingen, som vist i figur 4.11.

Fordeling

Fordeling 2 har tydelige svakheter når antallet ladeøkter over en uke stiger. Dette er fordi faktoren som skalerer antall biler som ankommer bare gjør dette for de tidspunktene hvor det ankom biler i perioden parkeringsdataene er fra. Disse tidspunktene har alle en forventet tid på parkeringslengden og dermed blir det en opphopning av effekt i enden av parkeringsperioden. Dette kommer av valget å fokusere siste del av opplading i slutten av perioden dersom det ikke var flere daler i ladeperioden. Dermed blir det en opphopning som ligner på den man får ved fordeling 1, bare forskjøvet til senere i parkeringstiden.

En forutsetning for å gjøre fordelinger er at forbruket til elbillading og resten av bygget er kjent på forhånd. Effektforbruket til bygget er rimelig stabilt, med variasjoner som ser ut til å gjenta seg daglig. Dermed burde dette forbruket være mulig å predikere nokså godt. Predikering av elbillading krever mer informasjon om hvor lenge bilene står. Dette krever at informasjon om hvor lenge bilene står må kartlegges når bilene parkeres. Her har Oslo lufthavn Gardemoen en positiv egenskap i at det er en flyplass, og reisende vil dermed vite når de planlegger å returnere. Denne informasjonen må selvsagt eier av bilen være villig til å dele, som mulig kan lokkes frem gjennom for eksempel økonomiske intensiver. Prediksjonen av elbilladingen vil også endre seg ettersom biler ankommer. Dermed må prediksjonen alltid kunne oppdateres raskt.

Simuleringen

All simulering er gjort over en uke. Den tidligste tiden en simulert ladeøkt kan begynne er derfor tidlig mandag morgen. Dette betyr at økter som hadde startet helgen før blir ikke tatt med. Basert på datasettet er ikke dette helt ukjent, men blir mindre sannsynlig dersom man justerer opp forventet antallet ladeøkter. I tillegg til dette vil flere av ladeøktene som starter sent i uken få tildelt en så lang parkeringstid at det vil gå ut i uken etter. Ettersom fordeling 2 prioriterer å fordele effekten ved slutten av parkeringsperiodene betyr dette at enkelte ladeøkter kan bli tildelt å lade uken etter, og ikke i løpet av uken som blir undersøkt. Dermed blir det en forskjell i hvor mye energi som lades over hele fordeling 1 og fordeling 2. Dette vil ha påvirket resultatene slik at fordeling 2 vil se bedre ut enn fordeling 1, ettersom litt av effektforbruket blir forskjøvet ut av tidsperioden som undersøkes.

Økonomi

Motivasjonen for å i det hele tatt endre lademønsteret til elbilene er å senke kostnadene knyttet til strømforbruk, som forklart i 2.1. For å gjøre dette må effektforbruket reduseres den timen i året det er høyest effekt på hele anlegget. Ettersom datasettet for denne oppgaven kun omhandler energiforbruk for parkeringshuset P10, er det ikke mulig å se hvor mye dette kan reduseres ved å styre elbilladingen. Likevel gir det store fleksibilitetspotensialet store muligheter for å senke forbruk til elbillading uten problemer. Dersom man kan forutsi når en stor topp vil oppstå, vil det være uproblematisk å skru ned lading av elbiler og på den måten senke strømkostnader for hele året.

Fremtidig utvikling

Parkeringsanlegget P10 har 379 uttak til elbillading. I scenariet der forventet antall ankomster er skalert med en faktor på 10 er det maksimale antallet biler som står parkert samtidig 270. Man kan dermed se for seg at i perioder med stor pågang vil effektforbruket være enda høyere enn det som er presentert i scenariet. Dermed kan en vil det være scenarier der parkeringsplassen kan være enda mer oppfylt enn det som ble beskrevet i denne oppgaven. I slike tilfeller vil fordeling av lading kunne senke effekttopper betraktelig.

Kapittel 5

Konklusjon og videre arbeid

5.1 Konklusjon

Hovedmålet ved denne oppgaven var å **(H)** anslå mengden forbrukerfleksibilitet som finnes i parkerte elbiler ved Oslo lufthavn Gardermoen. For å gjøre dette ble fire undermål formulert og undersøkt.

De historiske parkeringsdata tilgjengelig ved parkeringshus P10 ved Oslo lufthavn Gardermoen **(U1)** strakk seg over perioden 21. september 2020 til 23. mars 2021, da datasettet ble hentet ut. Datasettet viste en jevnt over lang parkeringstid for elbiler som lader ved P10. Den lange parkeringstiden var en forutsetning for fleksibiliteten som de parkerte bilene kunne tilby.

Estimerte ladeeffekter ble beregnet ved hjelp av ladeeffekter fra batteridrevne elektriske biler fra det norske markedet og deres respektive markedsandel. Denne ladeeffekten, samt en ladeeffekt fra arbeidet til Lekang et. al. [29], ble brukt til å estimere et effektforbruk som ble sammenlignet med målte AMS-data fra elbilladingen ved bygget **(U2)**. De estimerte effektforbrukene samsvarte godt med det målte, utenom enkelte høye topper. Denne ladeeffekten ble benyttet videre i estimatet av fleksibilitetspotensialet **(U3)**.

For å undersøke hvor godt dette fleksibilitetspotensialet lot seg realisere, og hvor sensitivt det var til endringer i forutsetningene, ble det gjort simulering ved hjelp av Monte Carlo metoden **(U4)**. To fordelingsmetoder ble benyttet hvor den første ladet ukritisk fra bilen koblet til, fordeling 1, og den andre fordelte ladeeffekten på daler i effektforbruket til resten av bygget, fordeling 2. Syv individuelle scenarier ble undersøkt hvor det første ble brukt som kontroll. I de neste fire scenariene ble ulike forutsetninger som ladeeffekt, energibehov og ladetid undersøkt. For disse scenariene var forventet antall ladeøkter likt. For de neste to ble det forventede antallet skalert med faktor 5 og 10.

Oppgaven demonstrerer at det er mye fleksibilitet å hente fra parkerte elbiler ved Oslo lufthavn Gardermoen. Flexibilitetspotensialet er høyt i forhold til effektforbruket til lading av elbilene, og kan dermed tenkes at forblir høyt ved flere biler. Ved å benytte en enkel fordeling vil effekttopper på hele bygget kunne senkes, selv ved lav ladeeffekt og kortere parkeringstid. Dersom det ankommer flere biler ser man at det fremdeles vil være en effekt av å styre ladingen, men her er usikkerheten større.

5.2 Videre arbeid

Denne oppgaven benytter AMS-data og data fra ladepunkter ved parkeringshus P10 ved Oslo lufthavn Gardermoen. Perioden dataene er hentet fra er september 2020 til mars 2021, da det ikke fantes data fra tidligere. For å undersøke fleksibilitetspotensialet og hvordan det kan utnyttes bedre hadde en lengre måleserie vært nyttig. Perioden undersøkt er kun på vinterhalvåret, så hvordan sommerferie og andre lignende perioder som kunne påvirket datasettet blir ikke undersøkt i denne oppgaven. Dermed hadde det vært interessant å undersøke en lengre måleserie som tok for seg minimum et helt år.

Koronapandemien har satt en stopper for reising med fly. I oppgaven har det blitt undersøkt forhold som kunne imitere hvordan forutsetningene for fleksibilitet kan være etter pandemien. Primært vil parkeringsdata med flere ankomster bidra til at en kan gjennomføre simuleringen med større sikkerhet. Ved flere ankomster kan en undersøke hvor godt poissonfordelingen passer de virkelige verdiene, og om det er andre fordelinger som passer bedre. Dette vil typisk ha ulike mønstre gjennom forskjellige sesonger, et element som denne oppgaven ikke kunne undersøke.

Simuleringen gjøres kun over en uke, og resultatet blir derfor påvirket av randeffekter. Det er ingen økter som blir igjen fra helgen før, men øktene fordeles ut i uken etter. For å unngå dette kunne simuleringen gjøres over en større tidsperiode. Ved oppskalering av antall ankomster faller også fordeling 2 litt kort. Her ville det være interessant å ta for seg forskjellige fordelingsmetoder, som å prøve å minimere effektbruk over hele ladeperioden eller bare lade i gitte forutbestemte tidsintervaller der annen effektforbruk er lav.

Ladeeffekten er basert på et utvalg batteridrevne elektriske biler. Selv om denne effekten stemmer relativt godt med målte data, hadde det vært spennende å undersøke ladeeffektene ytterligere. Ved flere målepunkter gjennom økter og logging av "SoC" fra bilene kunne en fått et bedre bilde på hvordan bilene lades. Dette ville igjen gjøre at en kunne gjort bedre estimeringer av fleksibilitetspotensiale og mer presise simuleringer.

Bibliografi

- [1] Statistikk sentralbyrå. *Elektisitet*[Internett]. URL: <https://www.ssb.no/energi-og-industri/energi/statistikk/elektrisitet> (sjekket 25.05.2021).
- [2] Norges vassdrags- og energidirektorat. *Langsiktig Kraftmarkedsanalyse 2020-2040*. Okt. 2020.
- [3] FN Sambandet. *Klimaendringer*. URL: <https://www.fn.no/tema/klima-og-miljoe/klimaendringer> (sjekket 31.05.2021).
- [4] Norsk elbilforening. *Elbilsalg*[Internett]. URL: <https://elbil.no/elbilstatistikk/elbilsalg/> (sjekket 22.05.2021).
- [5] Det kongelige samferdselsdepartement. *Nasjonal transportplan 2022-2033*. Mar. 2021.
- [6] Norges vassdrags- og energidirektorat. *Hva betyr elbiler for strømmettet?* 2016.
- [7] Pöyry. *Vurdering av atferdsvirkemidler som kan bidra til reduksjon av effekttopper*. Ekstern rapport. Norges vassdrags- og energidirektorat, feb. 2019.
- [8] Norges vassdrags- og energidirektorat. *Strømvtaler, strømpriser og faktura*[Internett]. URL: <https://www.nve.no/reguleringsmyndigheten/stromkunde/stromavtaler-strompriser-og-faktura/> (sjekket 25.05.2021).
- [9] Personlig kommunikasjon med Wiggo Roar Dehli i Avinor. 2021.
- [10] Matteo Muratori. “Impact of uncoordinated plug-in electric vehicle charging on residential power demand”. I: *Nature Energy* 3 (mar. 2018), s. 193–201.
- [11] British broadcasting company. *Can you have a big 'switch off'?*[Internett]. URL: http://news.bbc.co.uk/2/hi/uk_news/magazine/6981356.stm (sjekket 24.05.2021).
- [12] Statnett. *Fleksibilitet i det nordiske kraftmarkedet 2018–2040*. 2018.
- [13] Åse Lekang Sørensen mfl. “Electricity analysis for energy management in neighbourhoods: Case study of a large housing cooperative in Norway”. I: *Journal of Physics: Conference Series* 1343 (nov. 2019), s. 012057. DOI: 10.1088/1742-6596/1343/1/012057. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1343/1/012057>.
- [14] Merla Kubli, Moritz Loock og Rolf Wüstenhagen. “The flexible prosumer: Measuring the willingness to co-create distributed flexibility”. I: *Energy Policy* 114 (2018), s. 540–548. ISSN: 0301-4215. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.12.044>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421517308704>.
- [15] R. D’hulst mfl. “Demand response flexibility and flexibility potential of residential smart appliances: Experiences from large pilot test in Belgium”. I: *Applied Energy* 155 (2015), s. 79–90. ISSN: 0306-2619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.07.088>.

- 1016/j.apenergy.2015.05.101. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261915007345>.
- [16] J. Twidell og T. Weir. *Renewable energy resources*. 3. utg. Routledge, 2015.
- [17] A. A. Akhil mfl. *DOE/EPRI 2013 Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA*. Sandia National Laboratories. Feb. 2015.
- [18] R.M Dell og D.A.J. Rand. *Understanding batteries*. The Royal Society of Chemistry, 2001.
- [19] Jung-Ki Park, red. *Principles and Applications of Lithium Secondary Batteries*. John Wiley & Sons, Ltd, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1002/9783527650408>.
- [20] Mahammad A. Hannan mfl. “State-of-the-Art and Energy Management System of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicle Applications: Issues and Recommendations”. I: *IEEE Access* 6 (2018), s. 19362–19378. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2817655.
- [21] Yu Miao mfl. “Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements”. I: *Energies* 12.6 (2019). ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en12061074. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/6/1074>.
- [22] Norsk elbilforening. *Elbiler i dag*. URL: <https://elbil.no/om-elbil/elbiler-idag/> (sjekket 28.05.2021).
- [23] BloombergNEF. *Battery Pack Prices Cited Below \$100/kWh for the First Time in 2020, While Market Average Sits at \$137/kWh*. URL: <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-cited-below-100-kwh-for-the-first-time-in-2020-while-market-average-sits-at-137-kwh/> (sjekket 25.05.2021).
- [24] Energi og klima. *Tesla varsler store fremskritt i batteriteknologi – den elektriske transportrevolusjonen skyter fart*. URL: <https://energiogklima.no/kommentar/tesla-varsler-store-fremskritt-i-batteriteknologi-den-elektriske-transportrevolusjonen-skyter-fart/> (sjekket 23.05.2021).
- [25] Olivier Bousquet, Ulrike von Luxburg og Gunnar Rätsch. “Advanced Lectures on Machine Learning”. I: bd. 3176. Springer, 2004. Kap. Monte Carlo Methods for Absolute Beginners. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-28650-9_6.
- [26] WIREs Comput Stat. 2014. DOI: doi:10.1002/wics.1314.
- [27] Britannica. URL: <https://www.britannica.com/topic/normal-distribution> (sjekket 31.05.2021).
- [28] Google LLC. URL: <https://www.google.no/maps/@60.1943454,11.1004041,969m/data=!3m1!1e3> (sjekket 31.05.2021).
- [29] Å.L. Sørensen mfl. “Analysis of residential EV energy flexibility potential based on real-world charging reports and smart meter data”. I: *Energy and Buildings* 241 (2021), s. 110923. ISSN: 0378-7788. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110923>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778821002073>.
- [30] *Elbilstatesikk*. URL: <https://elbilstatistikk.no/> (sjekket 20.04.2021).
- [31] Iliana Ilieva og Bernt Bremdal. “Flexibility-Enhancing Charging Station to Support the Integration of Electric Vehicles”. I: *World Electric Vehicle Journal*

12.2 (2021). ISSN: 2032-6653. DOI: 10.3390/wevj12020053. URL: <https://www.mdpi.com/2032-6653/12/2/53>.

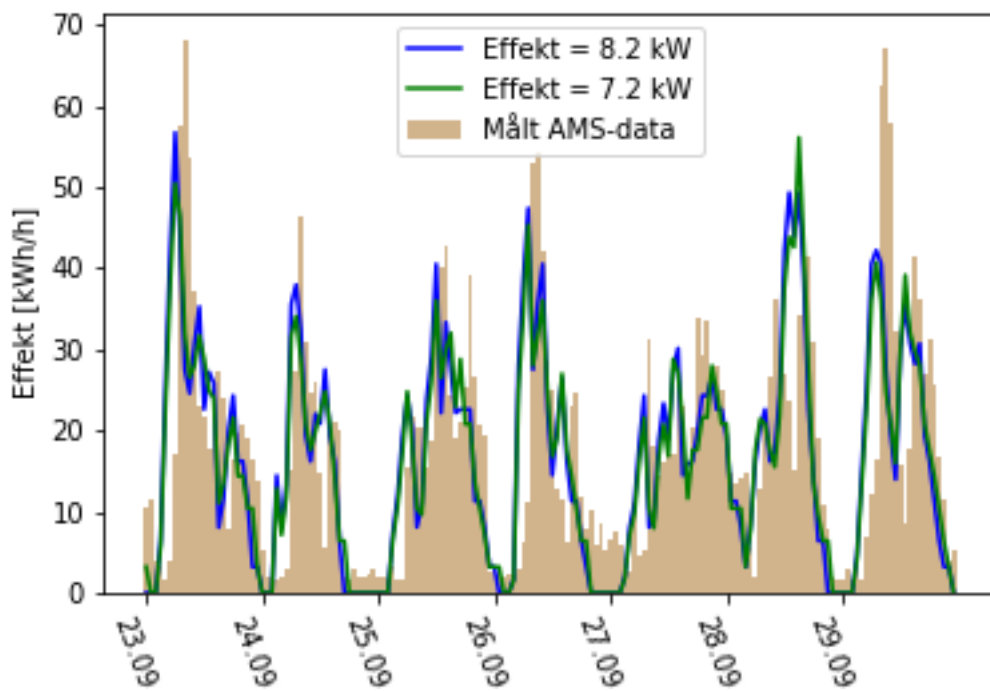
[32] Avinor. *Trafikkstatistikk*. URL: <https://avinor.no/konsern/om-oss/trafikkstatistikk/trafikkstatistikk>.

Vedlegg A

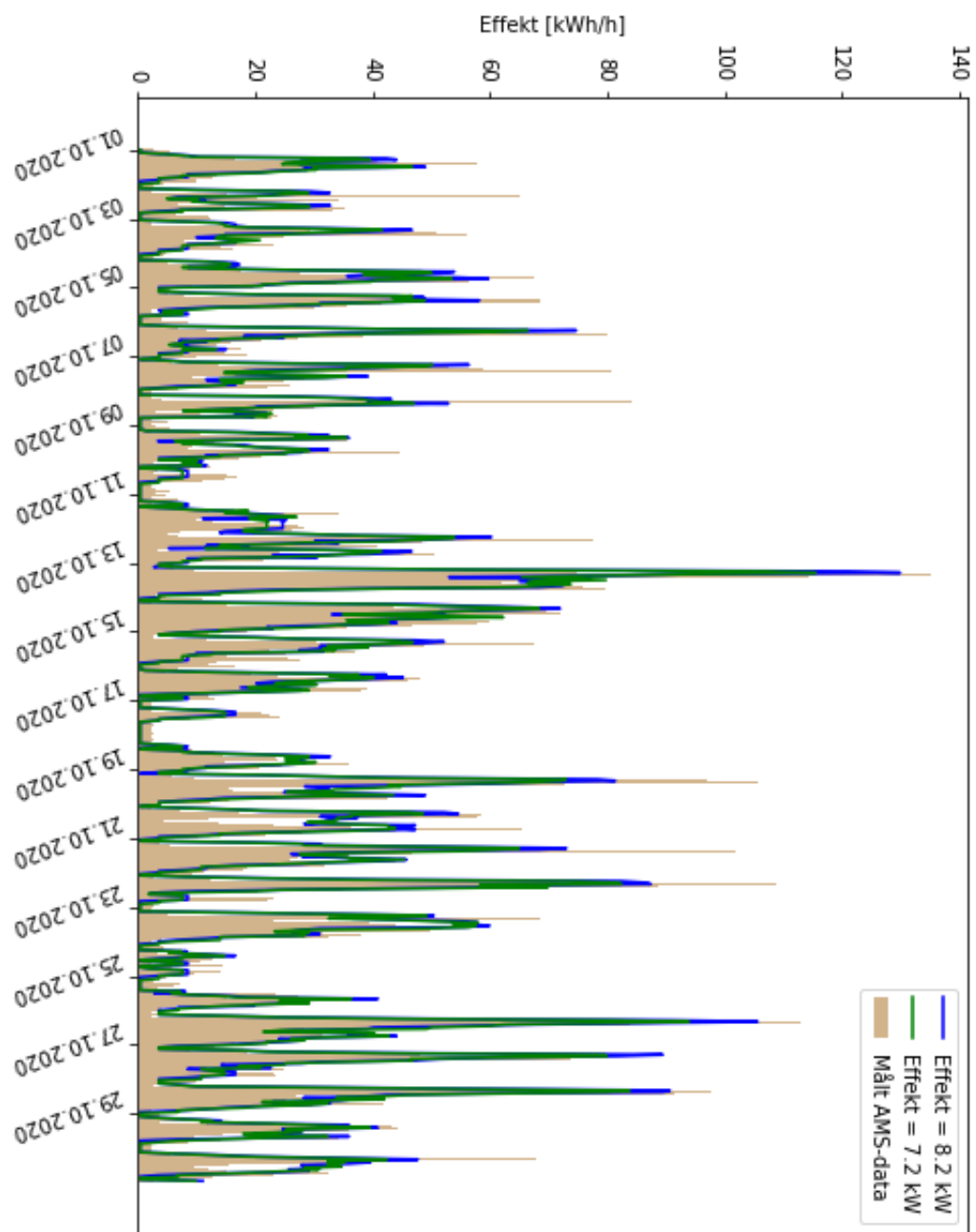
Alle resultater

A.1 Estimert effektforbruk

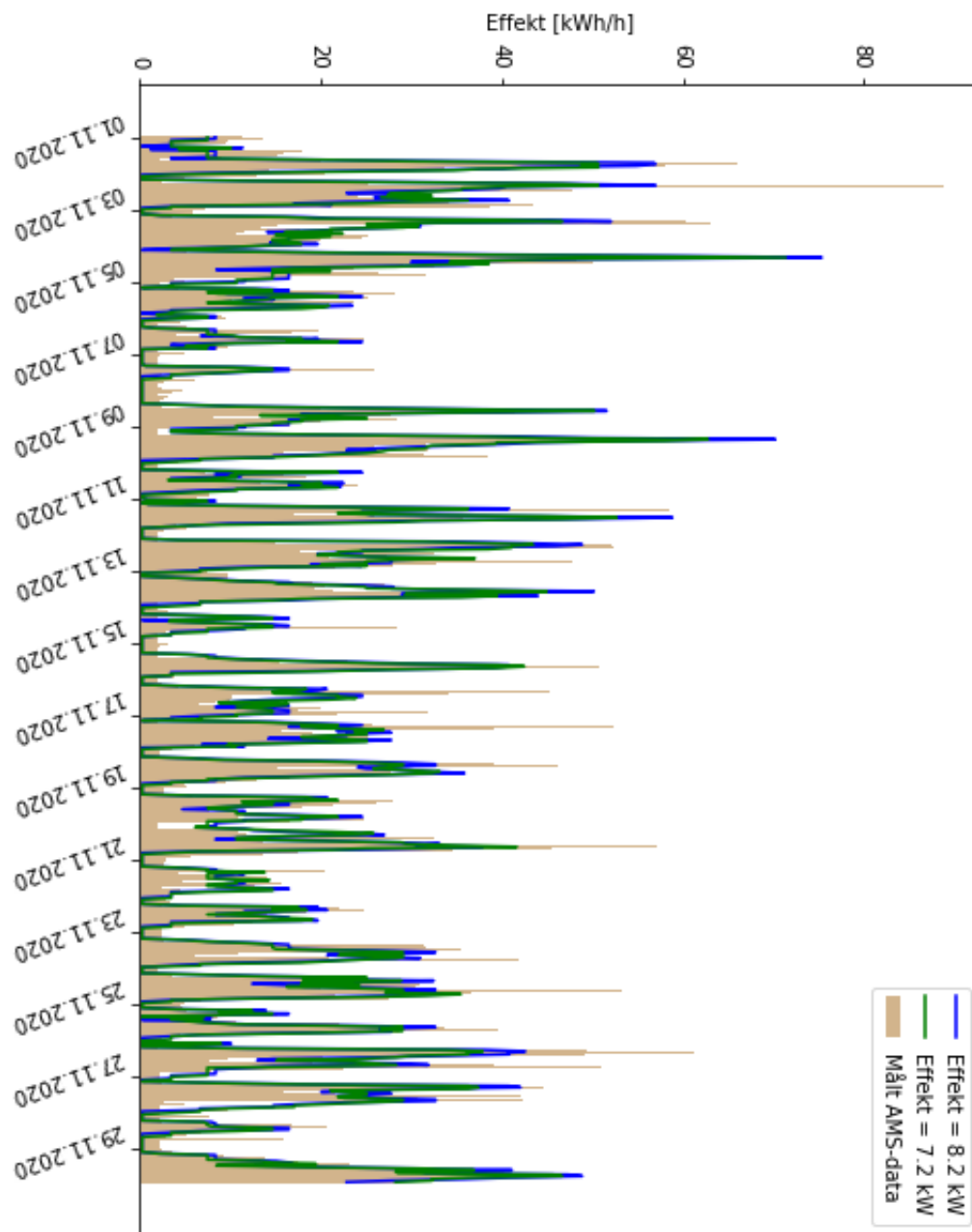
Her er alle figurene av det estimerte effektbruket mot det faktiske effektbruket.



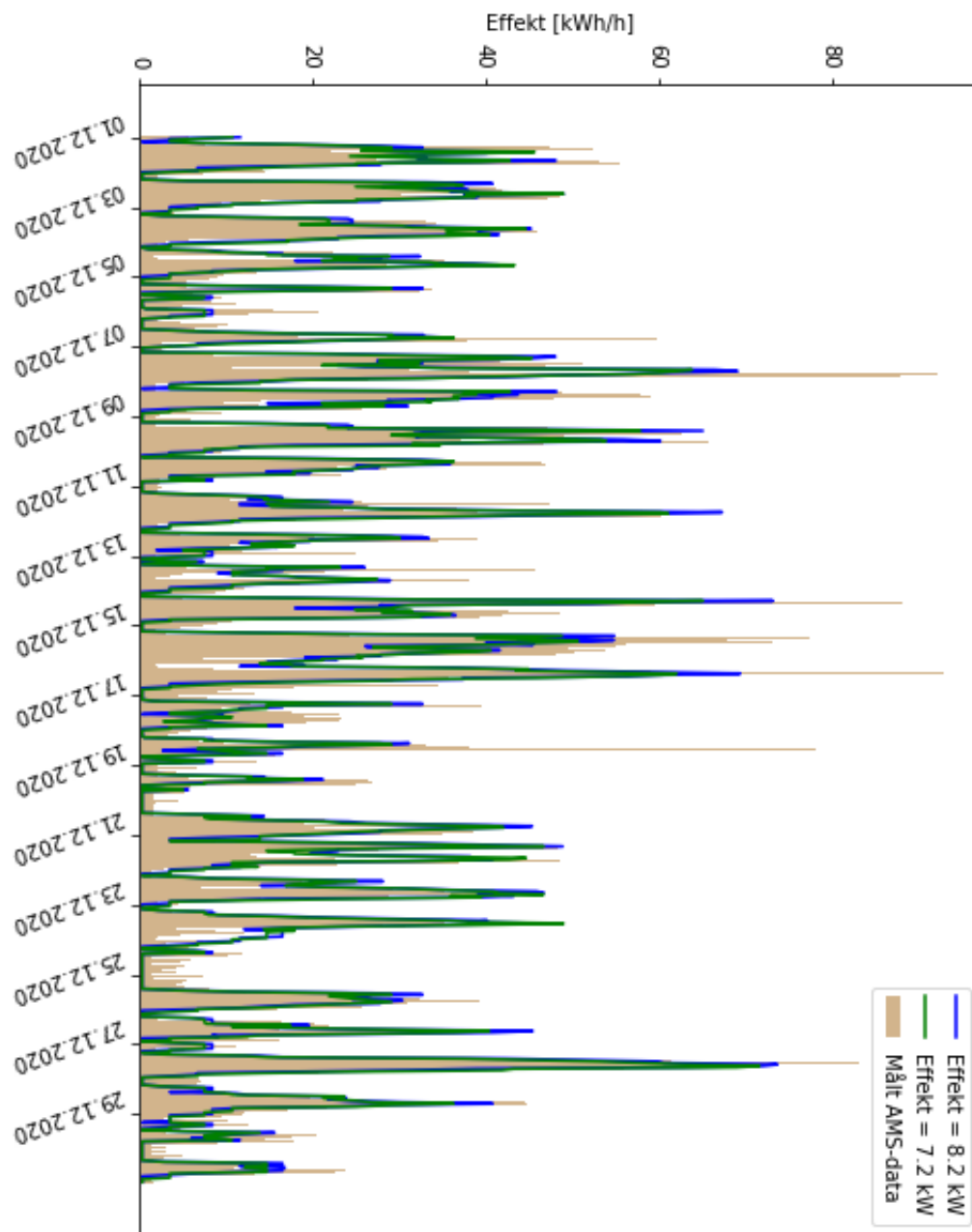
Figur A.1: Målt effektforbruk sammenlignet med estimert effektbruk med ladeeffekt 7,2kW og 8,1kW, for perioden 21. til 30. september 2020



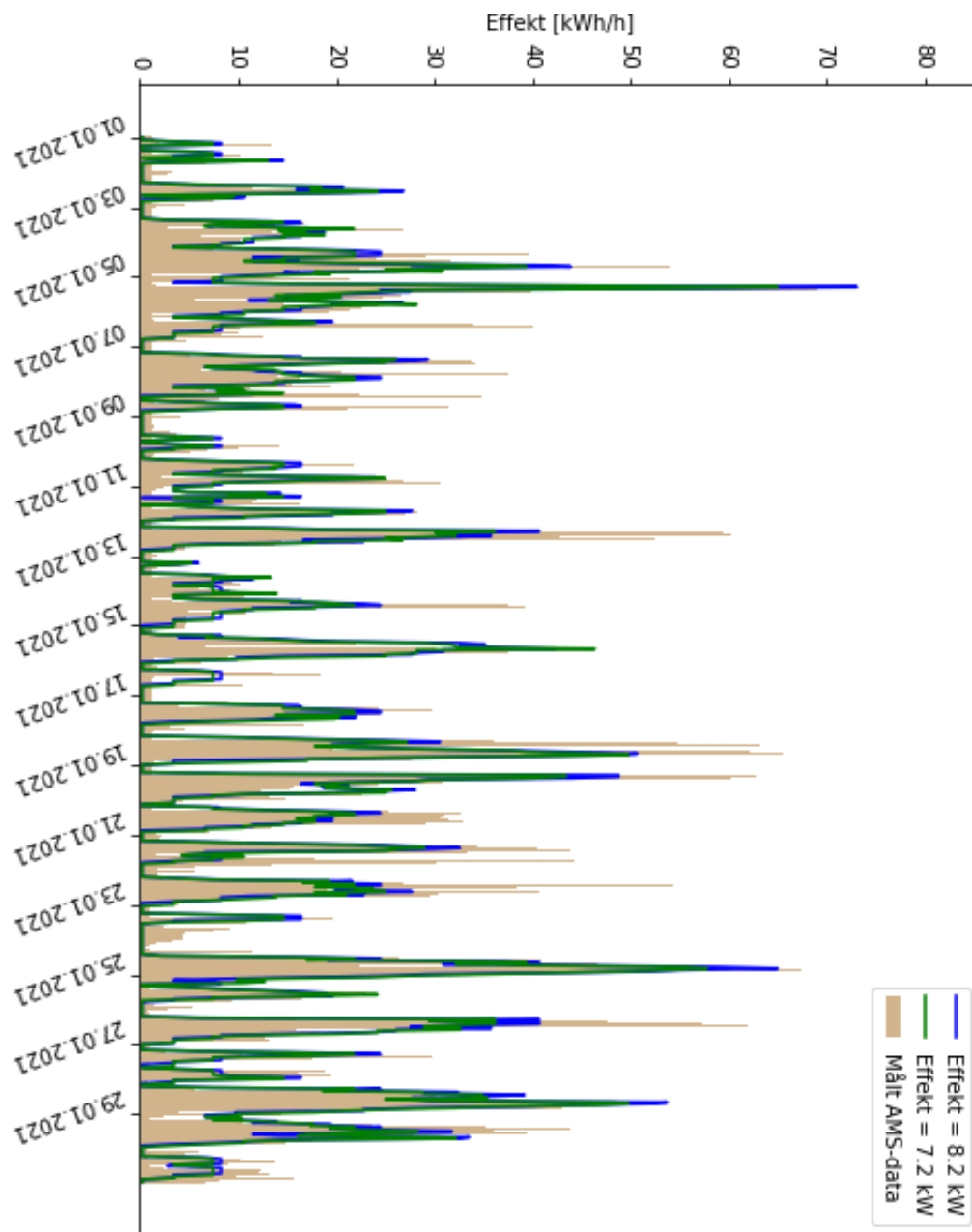
Figur A.2: Målt effektforbruk sammenlignet med estimert effektbruk med ladeeffekt 7,2kW og 8,1kW, for perioden 1. til 30. november 2020



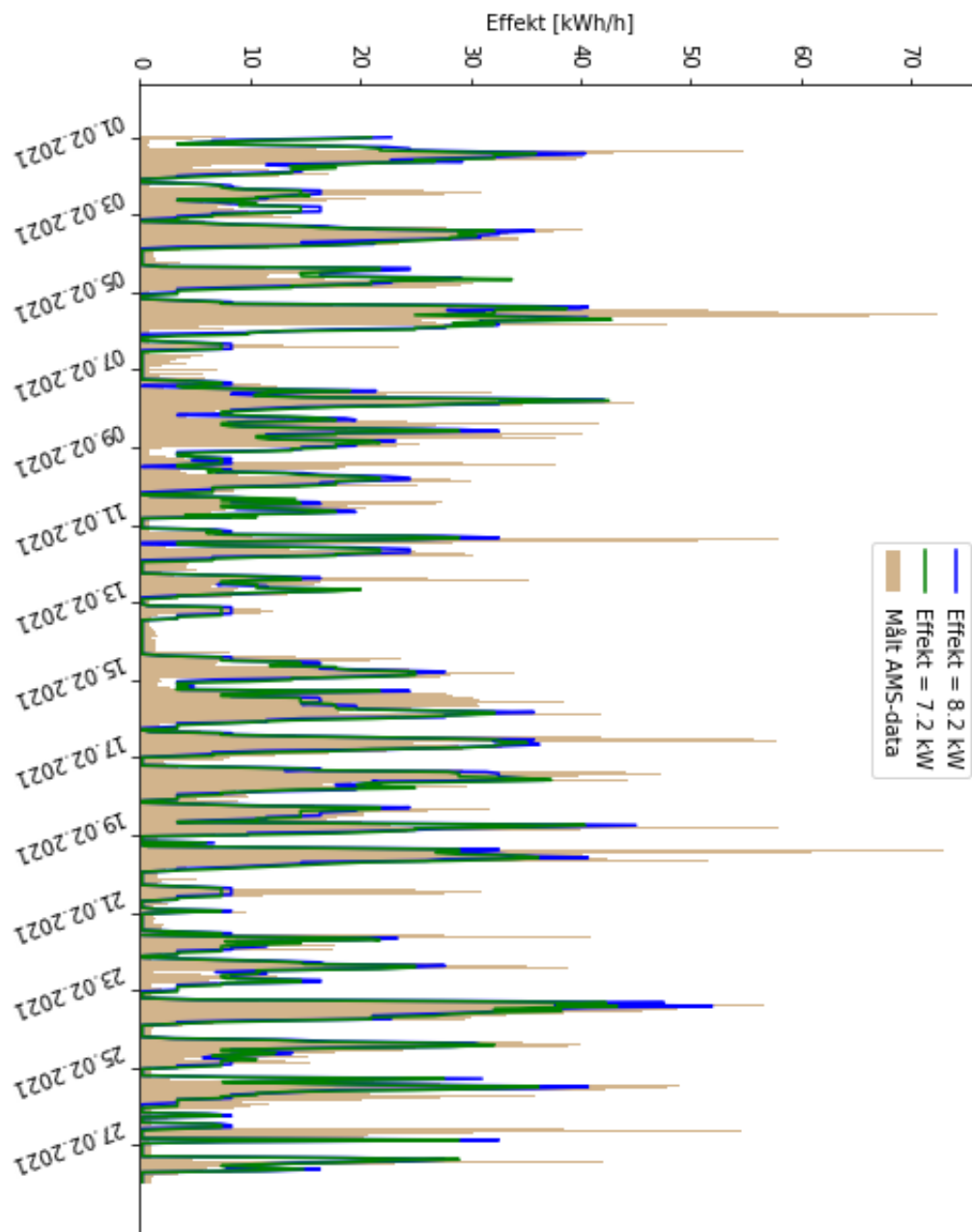
Figur A.3: Målt effektforbruk sammenlignet med estimert effektbruk med ladeeffekt 7,2kW og 8,1kW, for perioden 1. til 31. oktober 2020



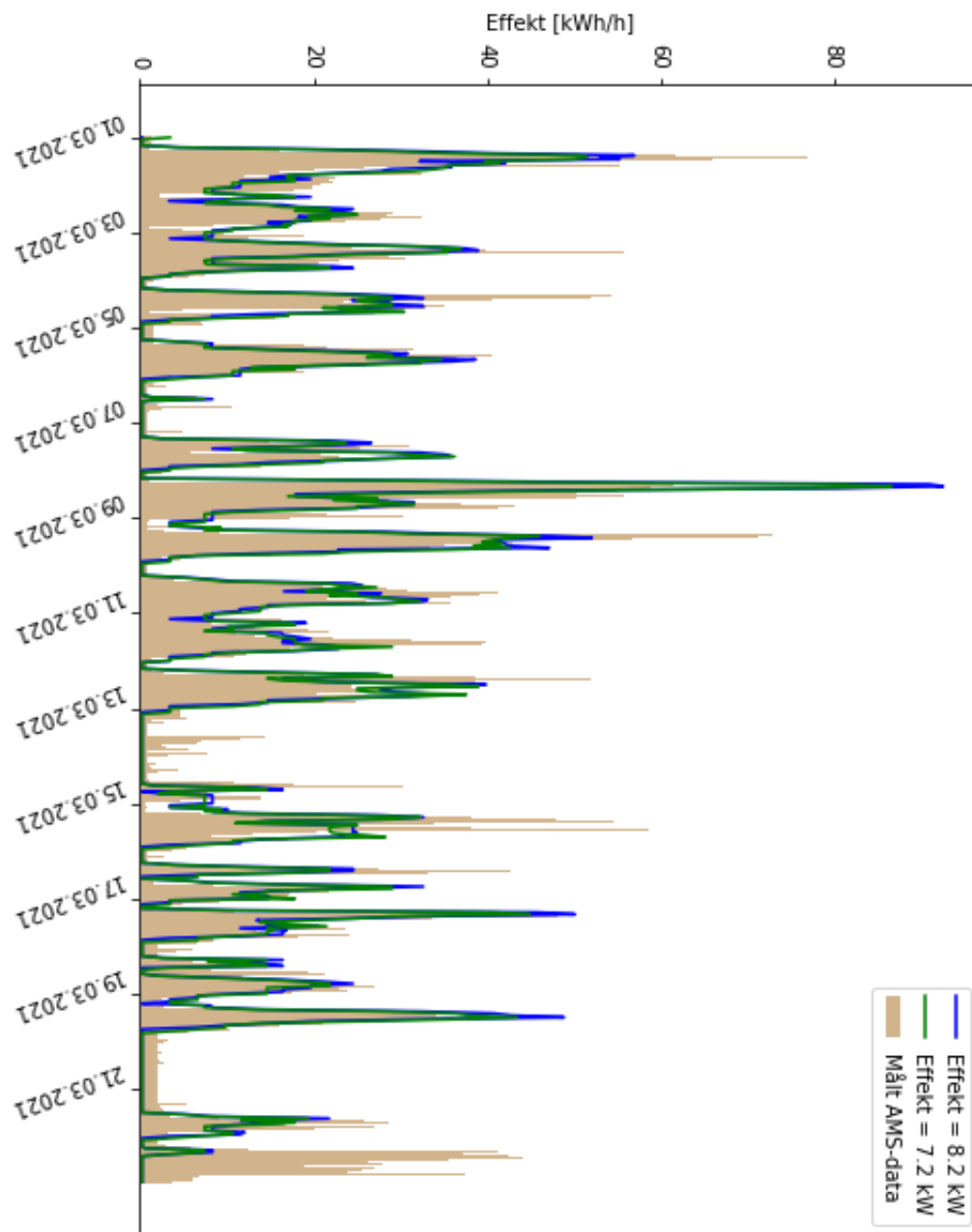
Figur A.4: Målt effektforbruk sammenlignet med estimert effektbruk med ladeeffekt 7,2kW og 8,1kW, for perioden 1. til 31. desember 2020



Figur A.5: Målt effektforbruk sammenlignet med estimert effektbruk med ladeeffekt 7,2kW og 8,1kW, for perioden 1. til 31. januar 2021



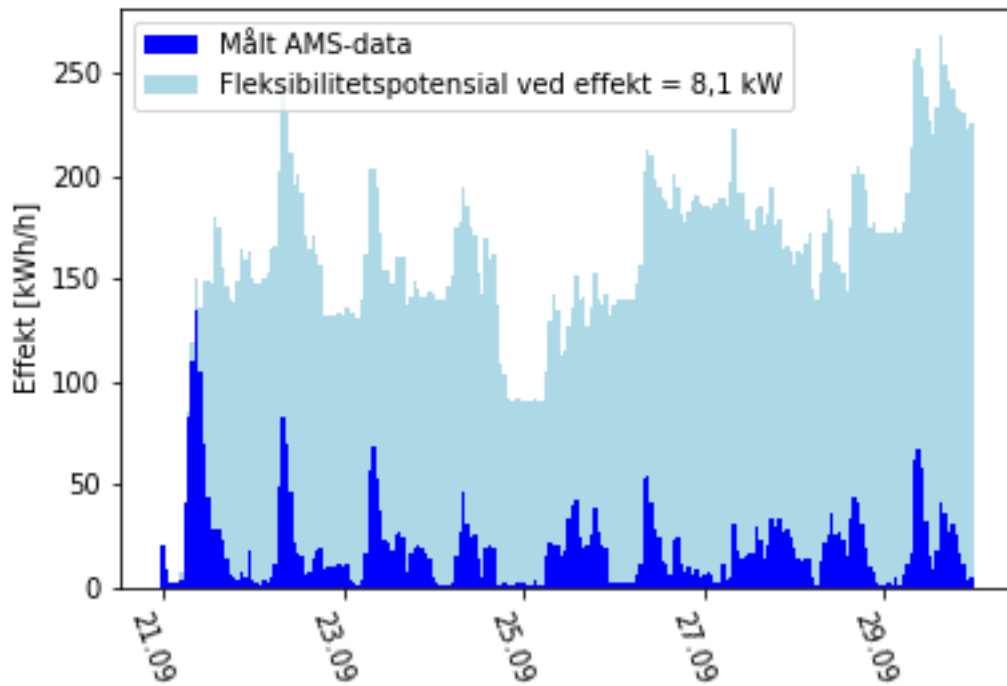
Figur A.6: Målt effektforbruk sammenlignet med estimert effektbruk med ladeeffekt 7,2kW og 8,1kW, for perioden 1. til 28. februar 2021



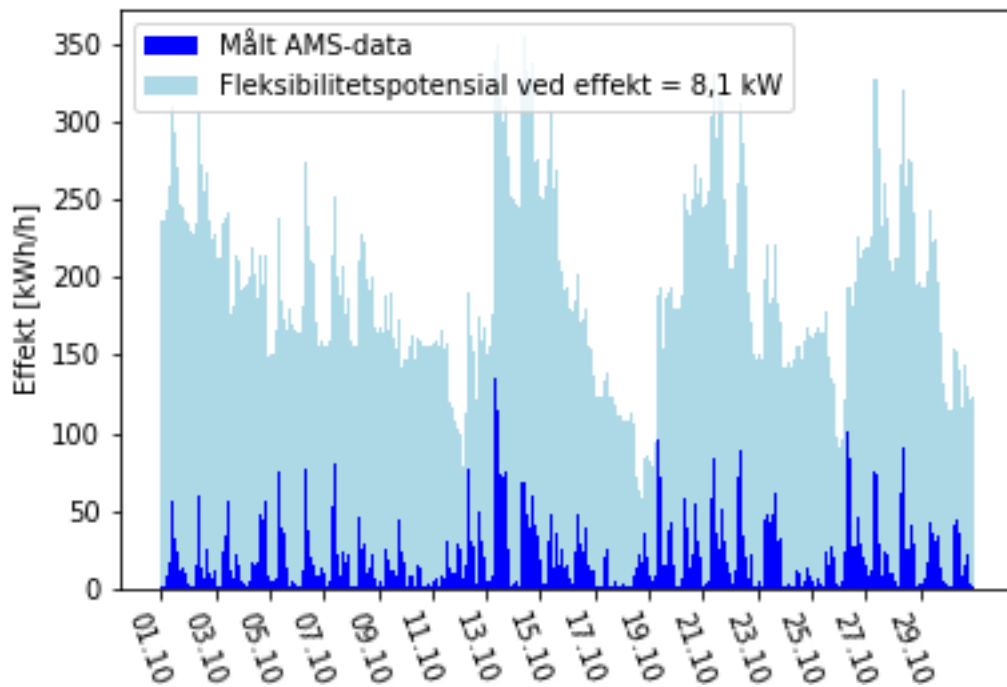
Figur A.7: Målt effektforbruk sammenlignet med estimert effektbruk med ladeeffekt 7,2kW og 8,1kW, for perioden 1. til 23. mars 2021

A.2 Fleksibilitetspotensiale

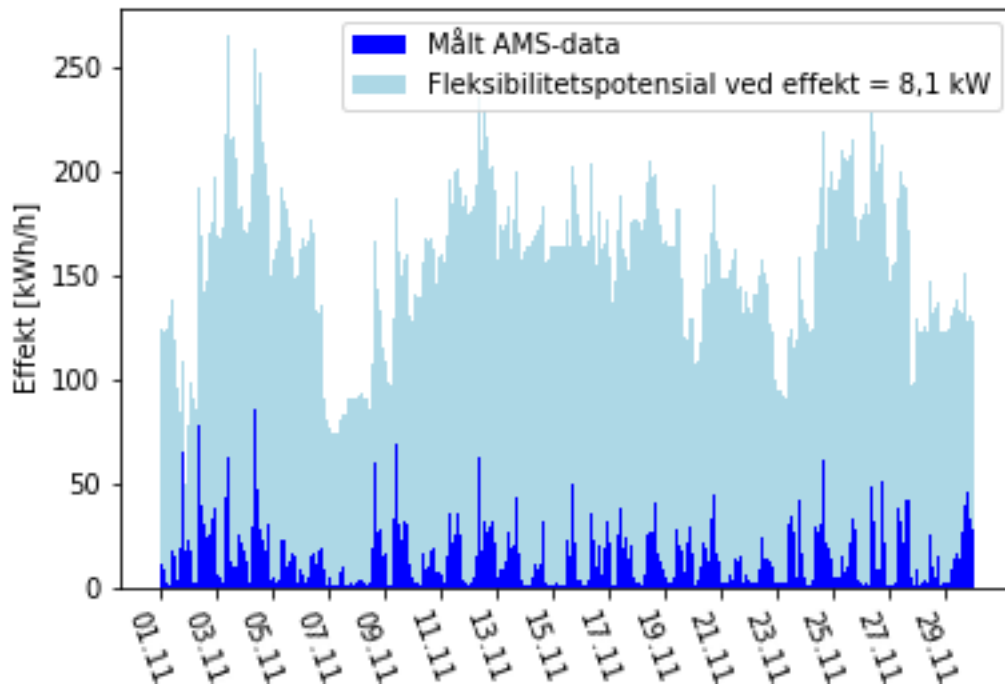
Her er figurene av det estimerte fleksibilitetspotensialet for hele perioden.



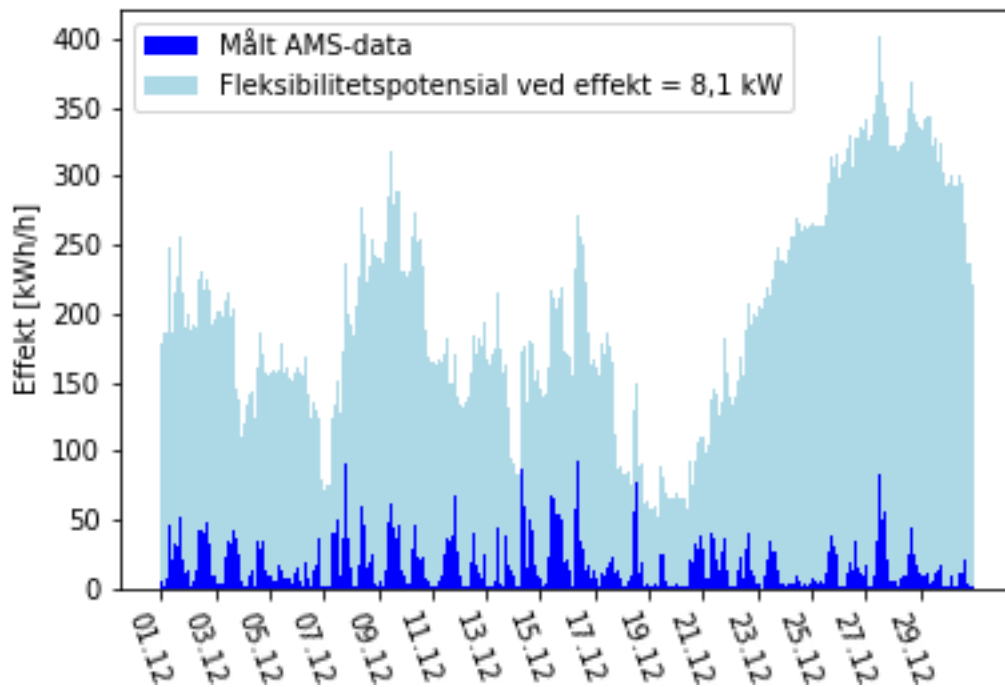
Figur A.8: Estimert fleksibilitetspotensiale for perioden 21. til 30 september 2020.



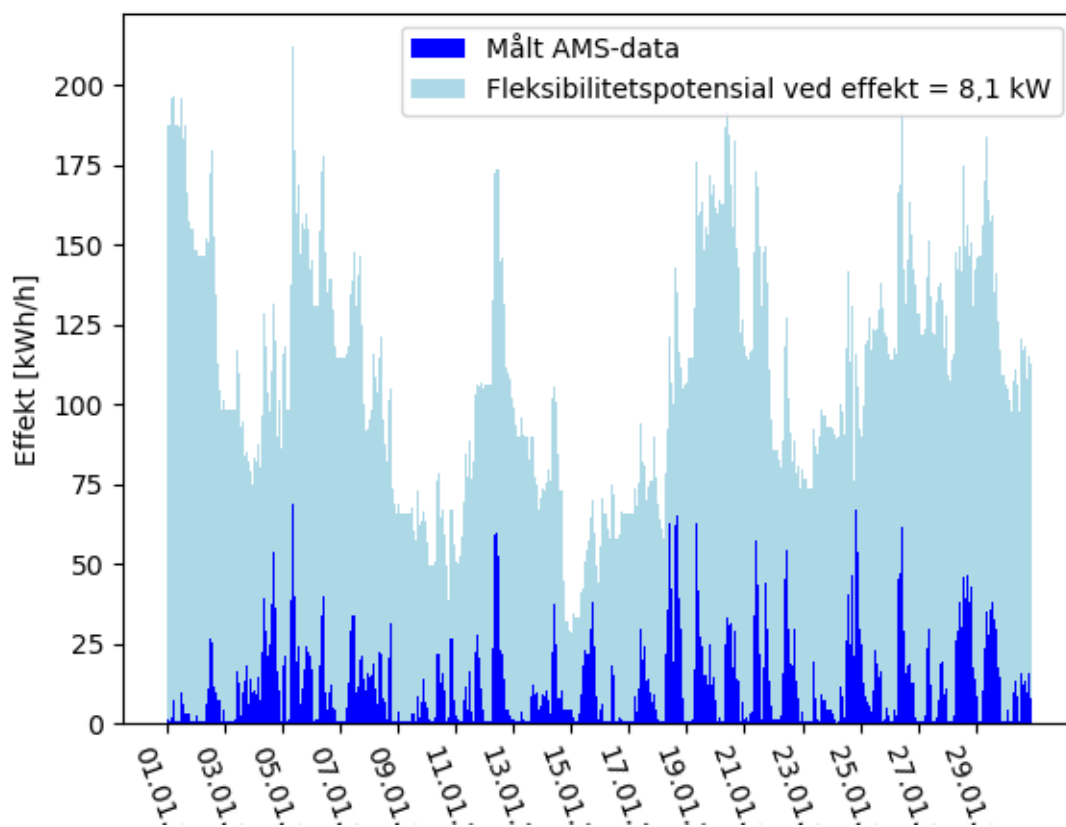
Figur A.9: Estimert fleksibilitetspotensiale for perioden 1. til 31 oktober 2020.



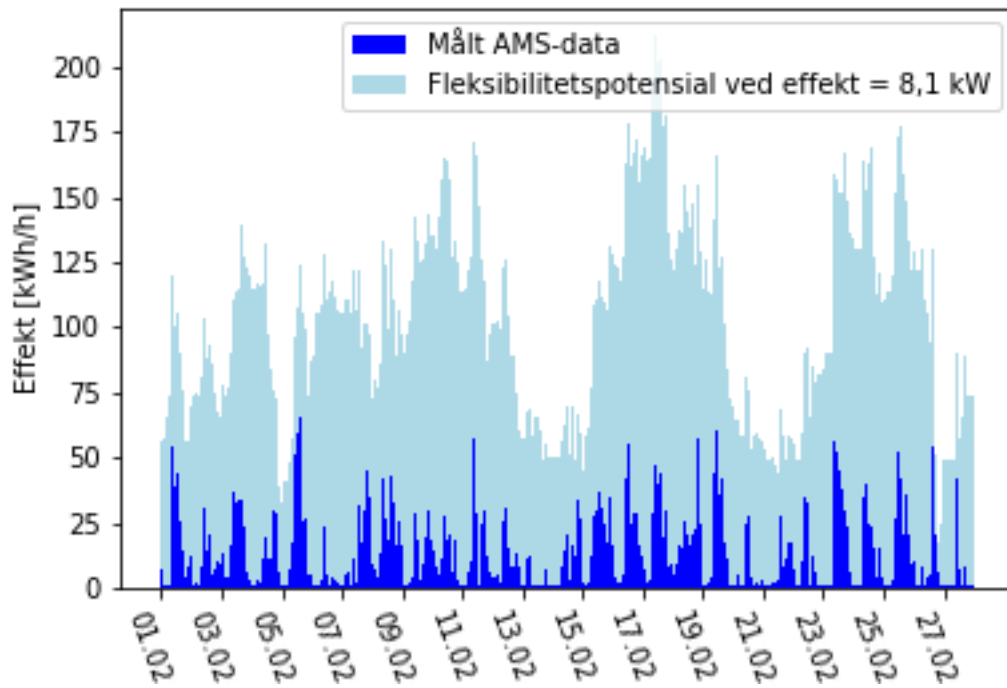
Figur A.10: Estimert fleksibilitetspotensial for perioden 1. til 30 november 2020.



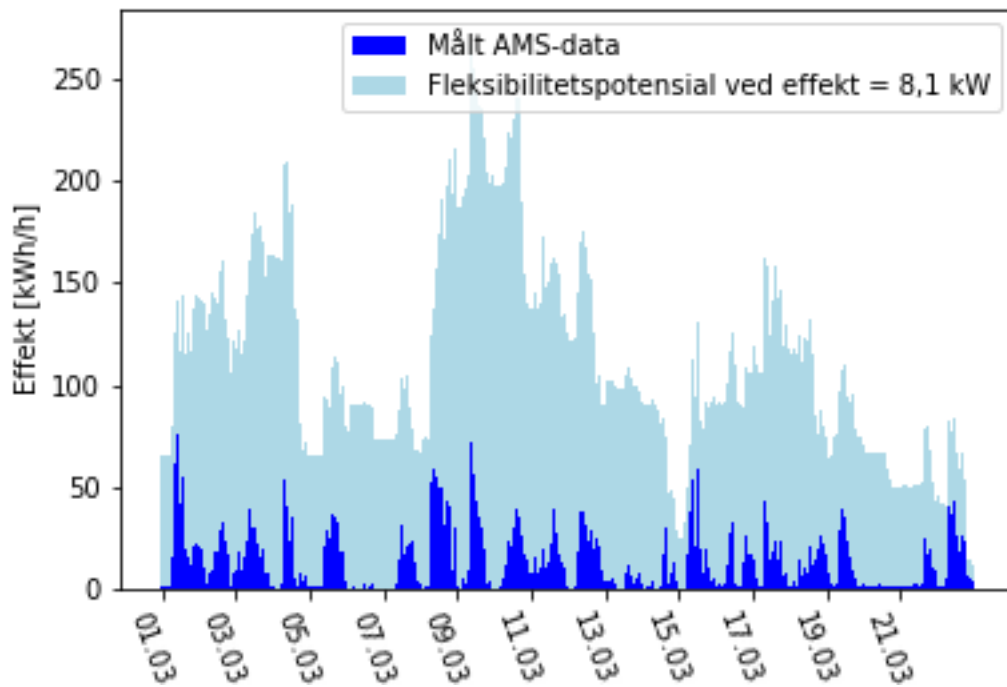
Figur A.11: Estimert fleksibilitetspotensial for perioden 1. til 31 desember 2020.



Figur A.12: Estimert fleksibilitetspotensial for perioden 1. til 31 januar 2021.



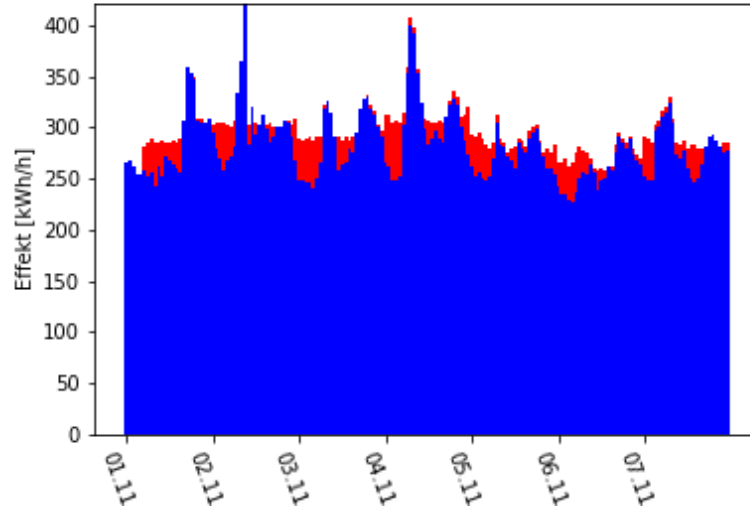
Figur A.13: Estimert fleksibilitetspotensiale for perioden 1. til 28 februar 2021.



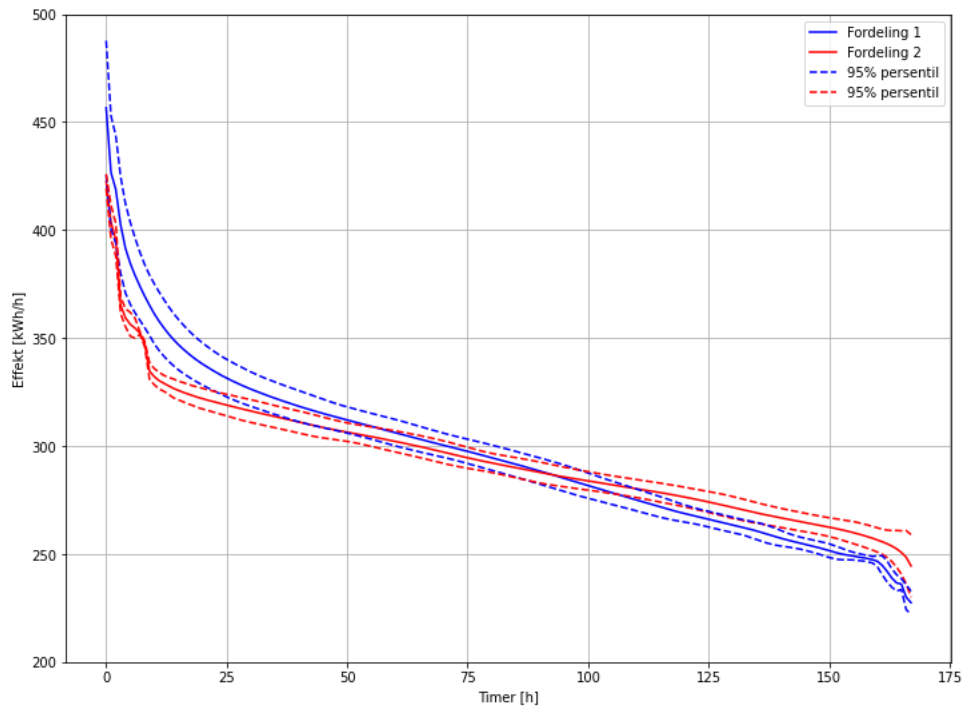
Figur A.14: Estimert fleksibilitetspotensiale for perioden 1. til 23 mars 2021.

A.3 Simuleringsresultater

Under er de fullstendige resultatene fra simulering av de forskjellige scenarioene.

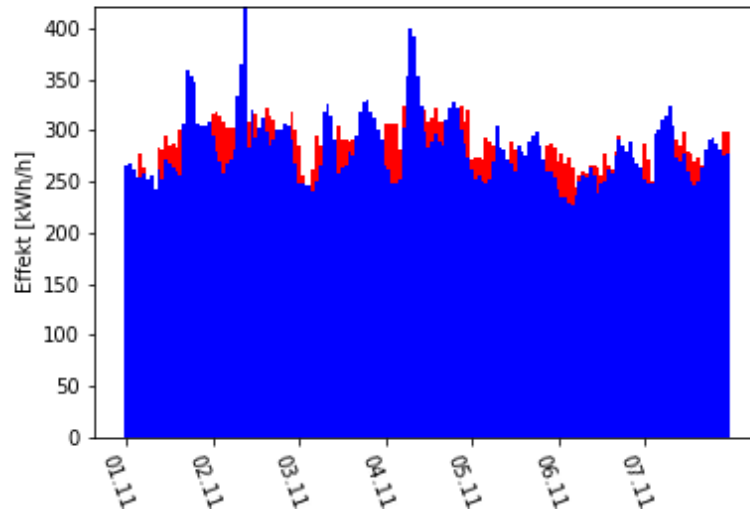


(a) Effektkurve med fordeling 2.

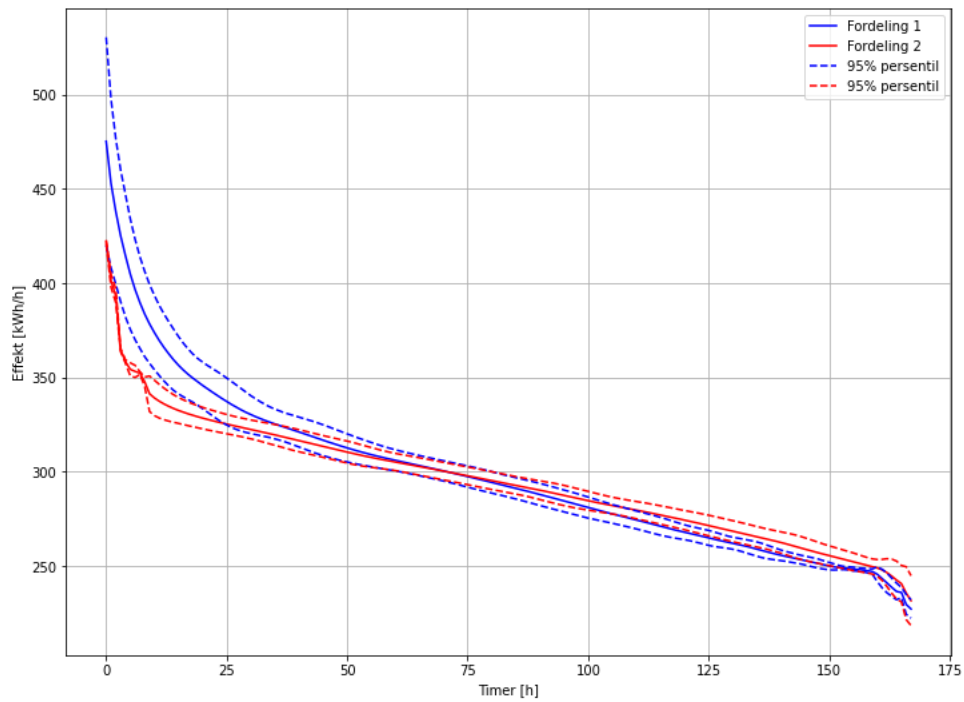


(b) Varighetskurve.

Figur A.15: Resultater for simulering av normal drift.

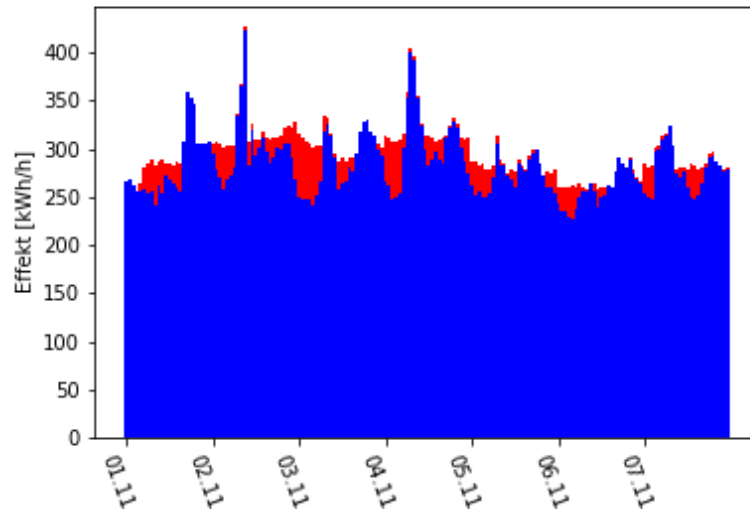


(a) Effektkurve med fordeling 2.

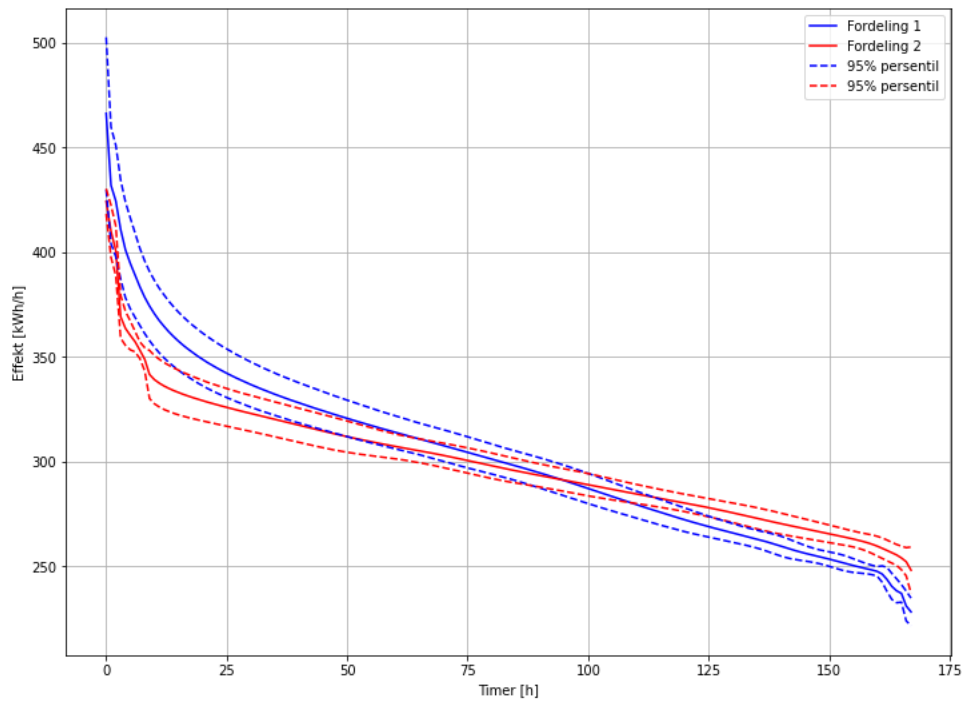


(b) Varighetskurve.

Figur A.16: Resultater for simulering ved ladeffekt på 22kW.

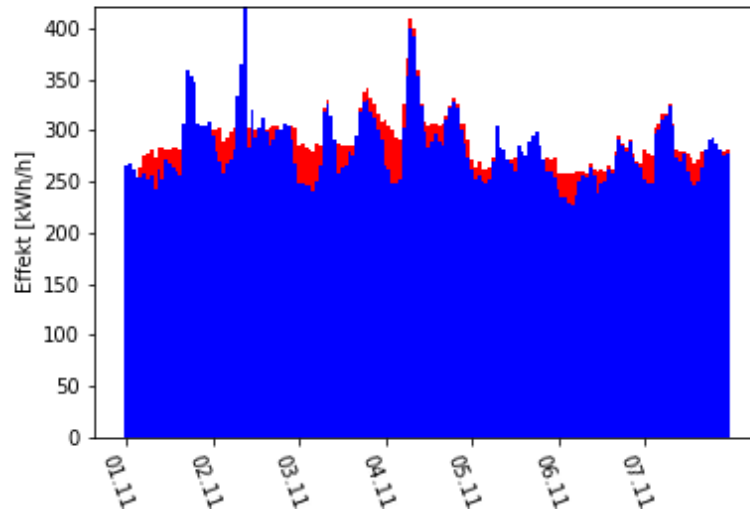


(a) Effektkurve med fordeling 2.

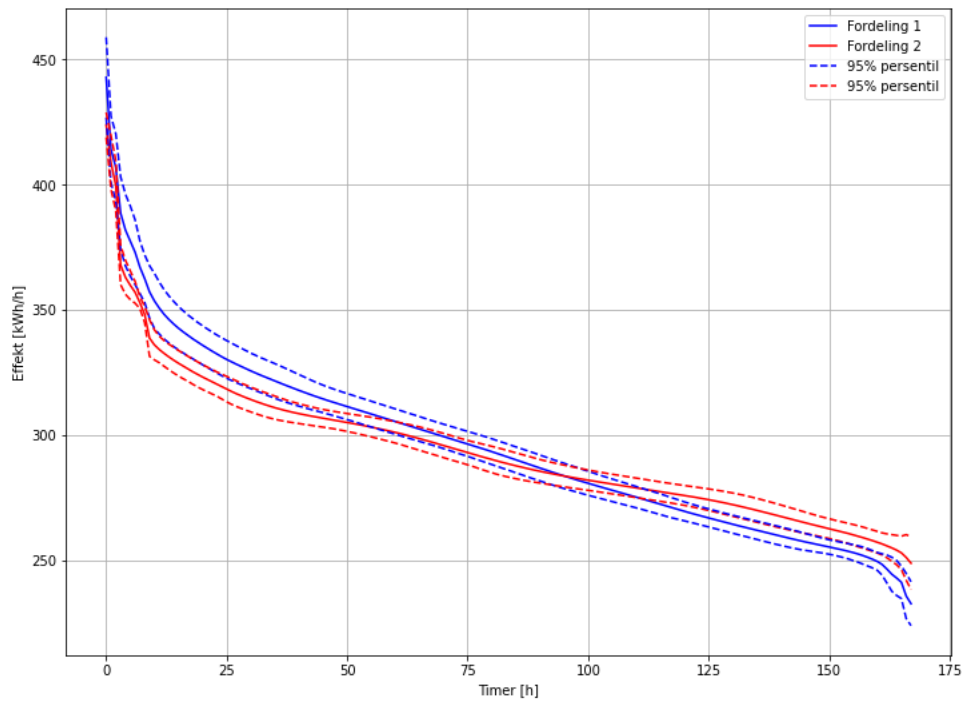


(b) Varighetskurve.

Figur A.17: Resultater for simulering ved høyere energibehov.

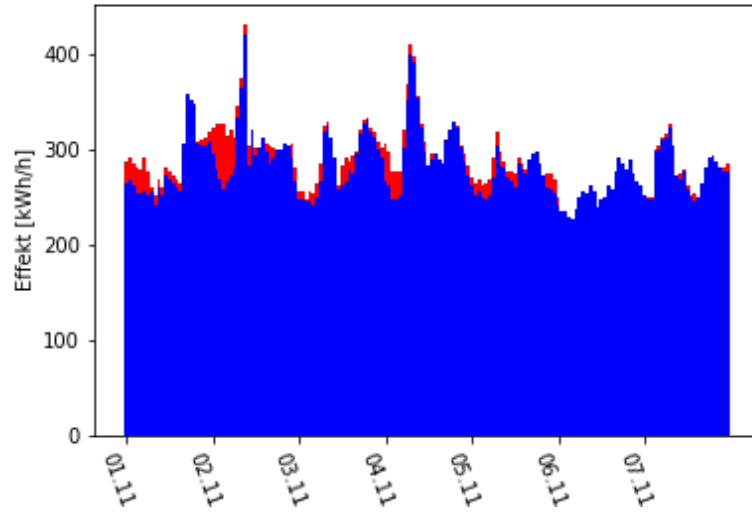


(a) Effektkurve med fordeling 2.

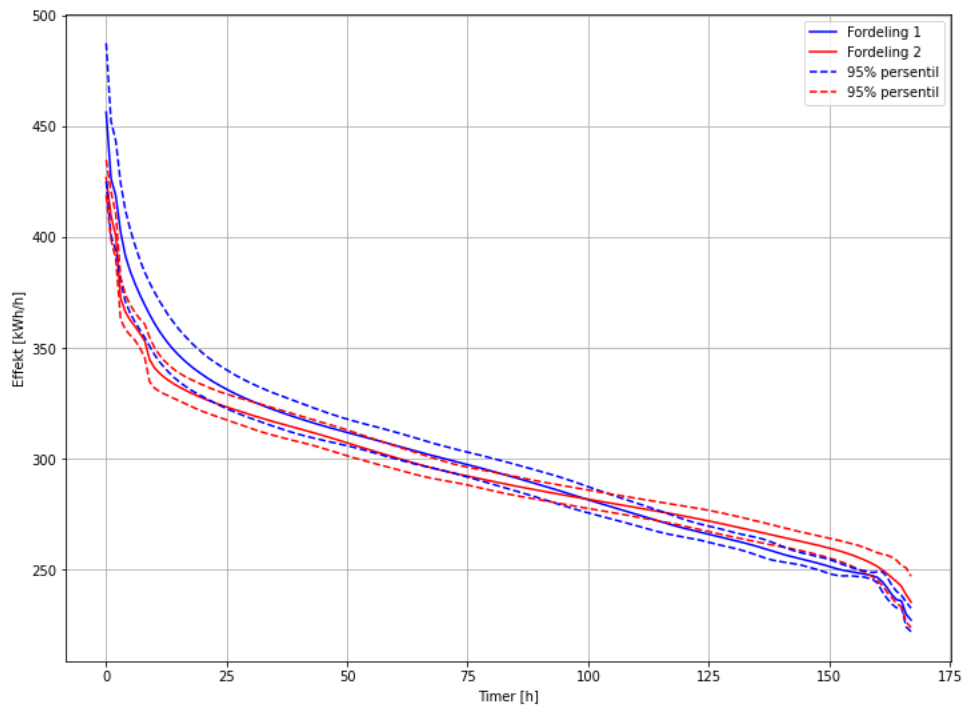


(b) Varighetskurve.

Figur A.18: Resultater for simulering ved ladeffekt på 3,2kW.

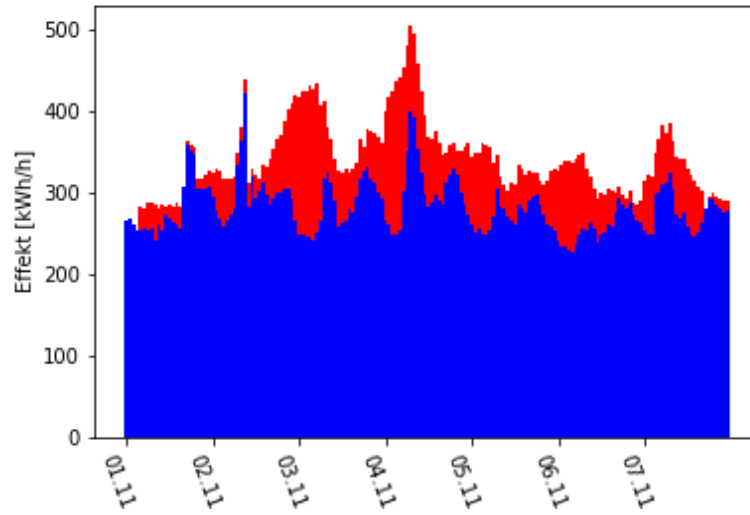


(a) Effektkurve med fordeling 2.

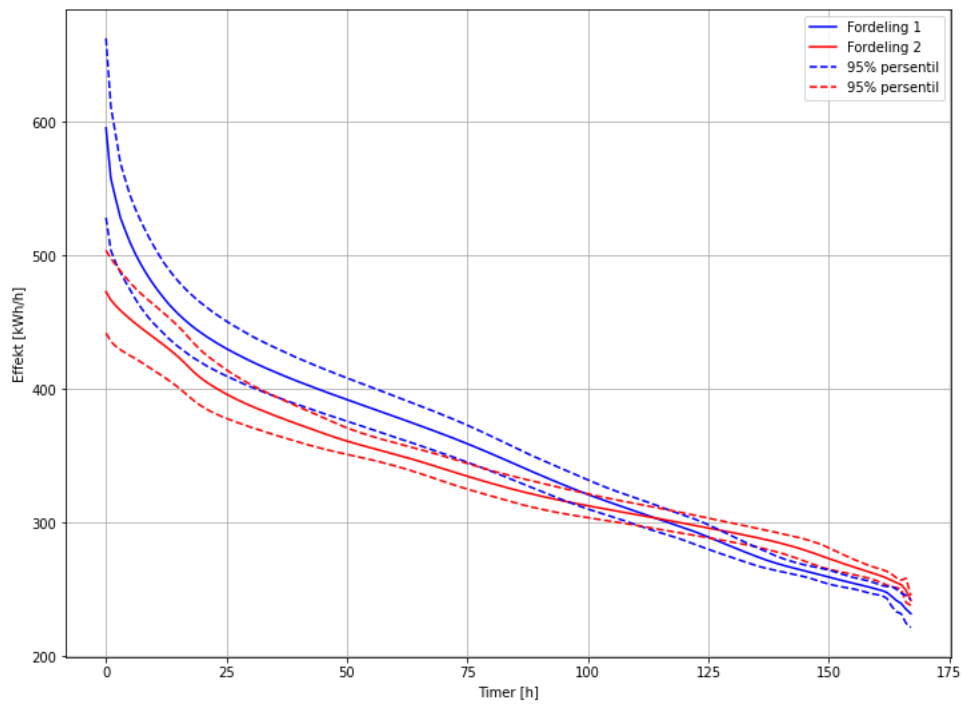


(b) Varighetskurve.

Figur A.19: Resultater for simulering ved lavere parkeringstid

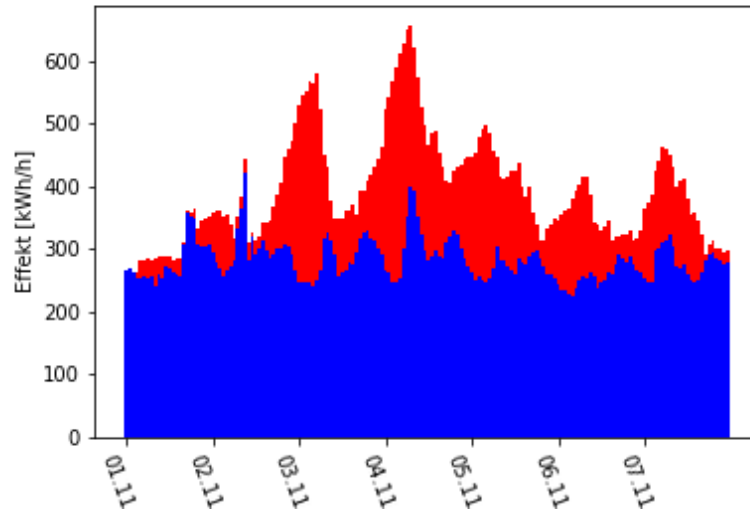


(a) Effektkurve med fordeling 2.

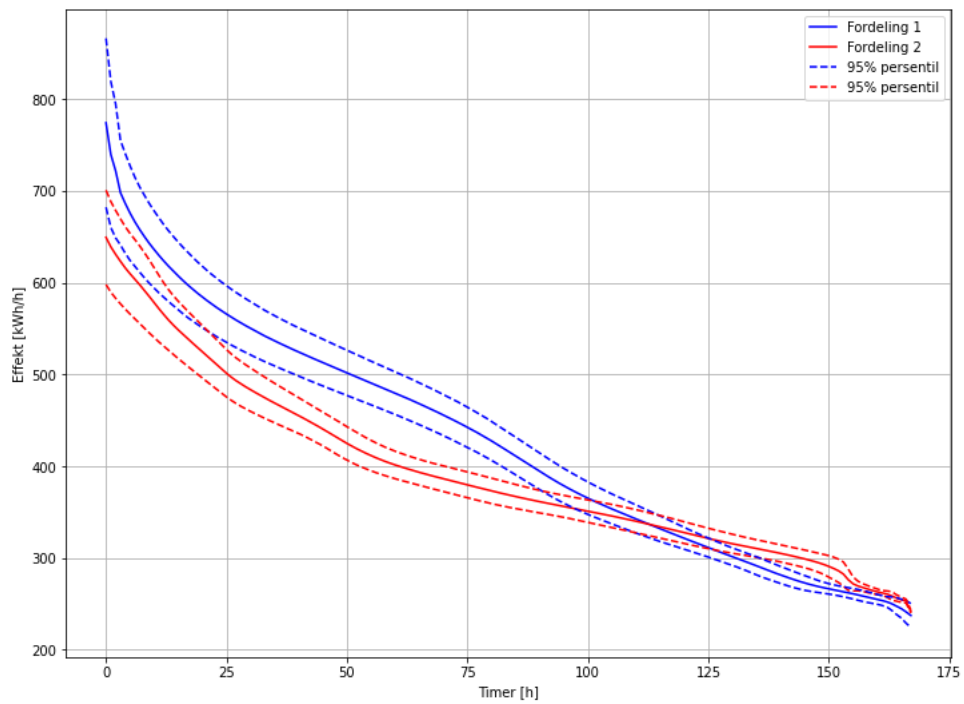


(b) Varighetskurve.

Figur A.20: Resultater for simulering ved antall forventede ladeøkter skaler med faktor 5.



(a) Effektkurve med fordeling 2.



(b) Varighetskurve.

Figur A.21: Resultater for simulering ved antall forventede ladeøkter skaler med faktor 10.



Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway