

Carla Beatrice Ilie
Ørjan Midtbø Lidal
Trygve Mølmen

Elektrifisering av containertrucker på Oslo Havn

Bacheloroppgave i Elektroingeniør, elkraft og bærekraftig energi
Veileder: Fredrik Ege Abrahamsen
Medveileder: Tor Arne Folkestad
Mai 2023



NTNU

Kunnskap for en bedre verden

Carla Beatrice Ilie
Ørjan Midtbø Lidal
Trygve Mølmen

Elektrifisering av containertrucker på Oslo Havn

Bacheloroppgave i Elektroingeniør, elkraft og bærekraftig energi
Veileder: Fredrik Ege Abrahamsen
Medveileder: Tor Arne Folkestad
Mai 2023

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for informasjonsteknologi og elektroteknikk
Institutt for elkraftteknikk



Kunnskap for en bedre verden

Sammendrag

Denne rapporten tok for seg erstatning av fem fossildrevne containertrucker på Oslo Havn, med elektriske. Bakgrunnen for denne erstatningen var FNs klimamål, og skjer i tråd med Oslo kommunes mål om å kutte klimautslippene med 85 % innen 2030. Oslo Havn er nå iferd med å omstille seg mot å bli en nullutslippshavn, og skal fase ut fossile kjøretøy.

Rapporten forsøkte å avgjøre hvor mange maskiner som ville være nødvendig for å utføre samme arbeidsmengde. Utregninger ble utført for å estimere dagens energibehov, ved hjelp av oppgitt kjøredata og teoretisk energiforbruk i dieselmotorer. Et Python-program ble laget for å simulere batteriladningsnivået over en arbeidsdag, med estimert energibehov som grunnlag. Programmet tok også hensyn til lavere batterikapasitet som følge av aldring og lave temperaturer. Simuleringer viste at en-til-en erstatning av dagens maskiner ikke var tilstrekkelig, grunnet begrenset batteristørrelse og stillestående ladetid. Derfor var det nødvendig med flere enn fem maskiner. Simuleringer viste at med syv elektriske maskiner, kunne minimum fem være i kontinuerlig drift. Videre ble det diskutert hvordan overgangen kunne foregå og hvilke konsekvenser dette ville ha økonomisk og miljømessig.

Grunnet usikkerheter i beregninger, teknologi under utvikling, og nødvendigheten for leveringssikkerhet, konkluderes det med at overgangen til elektrisk bør gjøres gradvis. På sikt kan syv elektriske containertrucker ha samme arbeidskapasitet som dagens fem fossile.

Nøkkelord: CO₂ utslippsreduksjon, containertruck, elektrifisering

Abstract

This report examined the possibility of replacing a fleet of five fossil fueled reachstackers at The Port of Oslo. The replacement machines were going to be fully electric. The replacement was considered due to the goal set forth by the City of Oslo to reduce carbon emissions by 85 % before the year 2030. The Port of Oslo must therefore contribute by phasing out fossil machinery.

The report attempted to determine the amount of electric machines needed to carry out the same workload. Calculations were performed to approximate the energy demand of the current fleet, using provided driving data and the theoretical energy consumption of diesel engines. A Python program was created to simulate the predicted battery level over the course of a workday, using the energy demand approximation as a baseline. The program also included reduced battery efficiency due to aging and low temperatures. Simulations showed that a one-to-one replacement was not possible, due to limited battery size and stationary charging time. To compensate for the stationary charging time, additional machines were needed in the new fleet. Simulations showed that with seven electric machines, a minimum of five could be operational at all time. Furthermore, there was a discussion about how the transition can take place and what consequences this will have economically and environmentally.

Due to uncertainties in calculations, technology under development, and the necessity for certainty of delivery, it is concluded that the transition to electric should be done gradually. In the long run seven electric reachstackers can have the same working capacity as today's five fossil reachstackers.

Keywords: CO₂ emission reduction, electrification, reachstacker

Forord

Denne oppgaven markerer gjennomført bachelor innenfor ingeniørfag, elektroingeniør med spesialiseringen elkraft og bærekraftig energi. Bacheloroppgaven er skrevet av Carla Beatrice Ilie, Trygve Mølmen og Ørjan Midtbø Lidal for Oslo Havn KF.

Å utføre en oppgave for en bransje de aller fleste ikke har innsikt i, men samtidig er såpass avhengig av, var en interessant mulighet. Prosessen Oslo havn er iferd med å gå igjennom er både tidsrelevant og utfordrende.

Vi vil takke Oslo Havn KF for godt samarbeid. Spesielt takk til Jens Eirik Hagen, Stian Fjell og Øyvind Martinsen for gode samtaler og imøtekommenhet. Vi ble svært godt mottatt på besøkene våre til Oslo Havns kontorer, og hadde produktive samtaler og diskusjoner som styrket oppgaven. I tillegg vil vi takke Yilport for omvisningen på Sjursøya containerterminal, og for datagrunnlaget de har bidratt med.

Videre vil vi takke vår hovedveileder Fredrik Ege Abrahamsen for god veiledning gjennom prosjektet. Vi vil også takke Tor Arne Folkestad for veiledning i hovedveileders fravær, som stilte opp til møter på kort varsel.



Trygve Mølmen



Carla Beatrice Ilie



Ørjan Midtbø Lidal

Mai 2023

Innhold

1	Innledning	1
1.1	Oslo Havn KF	1
1.2	Bakgrunn	2
1.3	Problemstilling	3
1.4	Delmål og begrensninger	3
1.5	Rapportens oppbygning	4
2	Teori	5
2.1	Reachstackere	5
2.2	Reachstackere på Sjursøya containerterminal	5
2.3	Elektrisk reachstacker	6
2.4	Valg av leverandør	6
2.5	Litium-ionbatterier (Li-ion)	6
2.5.1	Temperatur	7
2.5.2	Batteritemperatursystem	7
2.6	CCS-lading	7
2.7	Konduktiv lading	8
2.8	Dieselmotorer	8
3	Metode	9
3.1	Sammenligning av elektrisk og fossil	9
3.2	Effektberegning	10
3.2.1	Batteritemperatursystem	10
3.2.2	Dieselforbruk	11
3.2.3	Virkningsgrad	12
3.2.4	Kjemisk energi i diesel	12
3.3	Sammenstilling av usikkerheter	12
3.4	Lading, batteri og ladesyklus	14
3.5	Simulering i Python	15
3.6	Pris for elektriske reachstackere	16
3.7	Innhenting av erfaringer	17
3.8	Bruken av konduktiv lading	17
4	Resultater	19
4.1	En-til-en erstatning	19
4.2	Optimistisk løsning	20
4.3	Pessimistisk løsning	22
4.4	Ladeinfrastruktur	25
4.5	Svar på spørsmål fra andre havner	26
5	Vurdering av miljøhensyn	29

5.1	Utslippsreduksjon ved kjøring	29
5.2	Utslipp ved produksjon	30
5.3	Batteriets livsløp	30
5.4	Utslippsreduksjon	30
6	Diskusjon	32
6.1	Antall reachstackere og batteripakker	32
6.2	Alternative løsninger	32
6.3	Usikkerhet i beregninger	33
6.4	Ladeinfrastruktur	33
6.5	Økonomisk hensyn	34
6.6	Netto nåverdiberegning	35
6.6.1	Investeringskostnad	35
6.6.2	Driftskostnad	35
6.6.3	Avkastning på investering	36
6.7	Vurdering av informasjon fra andre havner	36
6.8	Samfunnsperspektiv	37
6.9	Overgangen til elektrisk	38
7	Konklusjon	40
8	Videre arbeid	41
8.1	Videreutvikling med ladeskinne	41
8.2	Simuleringsprogram	42
	Vedlegg	46
A	Python-kode	46

Tabeller

1	Oversikt over dagens fossile reachstackere	6
2	Kjøredata for fem fossile reachstackere i perioden 01.11.2022 - 31.12.2022 [24]	11
3	Dieselforbruk for RS og EH.	12
4	Oversikt over usikkerhetsintervallene til variablene som inngår i effektforbruket til elektriske reachstackere	13
5	Endring i effektforbruk ved største og minste verdi i usikkerhetsområdet . . .	14
6	Variabler i Python-kode	16

Figurer

1	Oversiktsbilde over havner og terminaler ved Oslo Havn [2]	2
---	--	---

2	Reachstackere	5
	(a) fossil reachstacker [8]	5
	(b) elektrisk reachstacker [9]	5
3	CCS lader [16]	8
4	Eksempel på ladesykluser fra Kalmar [26]	15
5	Elonroad konduktiv ladeskinne [27]	18
6	ELRS, En-til-en erstatning med dagens turnus. 587 kWh batteri, korreksjonsfaktorer lik 1.	19
7	ELEH, En-til-en erstatning med dagens turnus. 587 kWh batteri, korreksjonsfaktorer lik 1.	20
8	Forslag til ladesyklus for fire ELRS, optimistisk tilfelle. 587 kWh batteri. 2 timer lading, 10 timer kjøring.	21
9	Forslag til ladesyklus for tre ELEH, optimistisk tilfelle. 407 kWh batteri. 1 time lading, 7 timer kjøring	22
10	ELRS 587 kWh, korrigeret for pessimistiske forhold. 2 timer lading, 10 timer kjøring	23
11	Forslag til ladesyklus for fire ELRS, pessimistisk tilfelle. 587 kWh batteri. 1,5 time lading, 6,5 timer kjøring.	23
12	ELEH 407 kWh, korrigeret for pessimistiske forhold. 1 time lading, 7 timer kjøring.	24
13	Forslag til ladesyklus for tre ELEH, pessimistisk tilfelle. 407 kWh batteri. 1 time lading, 5 timer kjøring.	25
14	Ladesyklus i praksis [16, 28, 29, 30, 31]	26
15	Oversikt over kjøreområde for reachstackere fra Yilport. Mottatt på e-post 10.02.2023 fra Manager i Yilport	41

Begrepsavklaring

RS - Reachstacker. Fossil containertruck som kan løfte fullastede containere.

EH - Empty handler. Fossil containertruck som kun løfter tomme containere.

ELRS - Elektrisk reachstacker. En elektrisk containertruck som kan løfte fullastede containere.

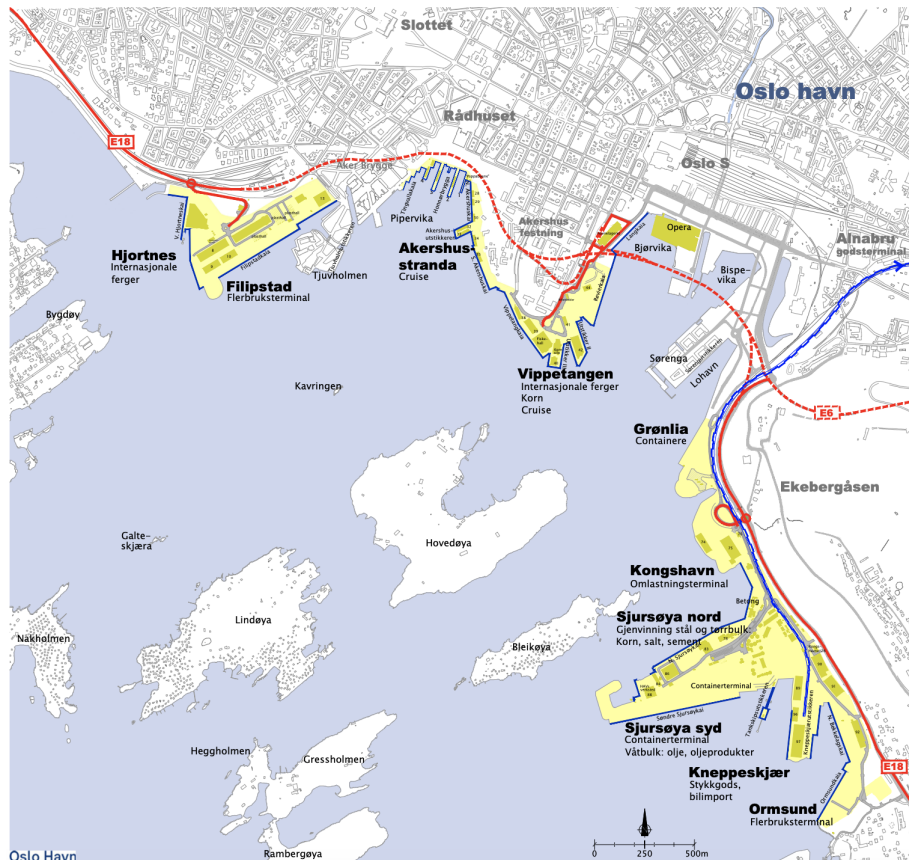
ELEH - Elektrisk empty handler. En elektrisk containertruck som kun løfter tomme containere.

1 Innledning

Elektrifiseringen av fossile kjøretøy er et svært aktuelt tema som omfavner store deler av dagens samfunn. Det er ikke bare personbiler som elektrifiseres, men også tyngre industrimaskiner. For å redusere dagens klimagassutslipp må alle deler av samfunnet bidra, inkludert bransjen til oppdragsgiver. I dette kapitlet introduseres oppdragsgiver, bakgrunnen for problemstillingen til rapporten, og rapportens oppbygning. Dette vil hjelpe leseren med å se det større bildet rundt denne oppgaven.

1.1 Oslo Havn KF

Oslo Havn KF er et kommunalt foretak underlagt Oslo Kommune. Oslo Havn KF har med sine rundt 110 ansatte som formål å sørge for effektiv og rasjonell havnedrift, men også tilrettelegge for effektiv og miljøvennlig sjøtransport. I tillegg kommer oppgavene med å føre oppsyn med trafikken på kommunens sjøområde, samt å forvalte eiendommer og innretninger på havneområdet på en god økonomisk og miljømessig måte. Oslo Havn er Norges største gods- og passasjerhavn og har terminaler, havner og kontorer som dekker store deler av strandlinjen ved Oslo sentrum og Sjursøya, noe som fører til at det ukentlig ankommer mellom 50 og 70 skip med gods og passasjerer [1]. Sentralt og nord-vest langs kystlinjen i Oslo sentrum ligger terminalene som hovedsakelig tar imot cruise og internasjonale ferger. Her foregår alt av passasjer-transport og ligger lett tilgjengelig fra Oslo sentrum. Kontorene til Oslo Havn KF ligger på Vippetangen og på Sjursøya, som vises på figur 1.



Figur 1: Oversiktsbilde over havner og terminaler ved Oslo Havn [2]

Sjørøya, som ligger øst i indre Oslofjord, er den delen av Oslo Havn som håndterer alt av gods gjennom Oslo Havn, foruten om gods som kommer med utenlandsferjene til Danmark og Tyskland [3]. Containerhavna på Sjørøya er Norges største og har siden 2014 blitt drevet av det Tyrkiske selskapet Yilport, som har som mål å bli blant de ti fremste havneoperatørene i verden innen 2025. Avanserte logistikksystemer og nytt terminalutstyr gjør containerterminalen til Norges mest moderne [4].

1.2 Bakgrunn

FNs bærekraftsmål er arbeidsmål som verden felles har satt sammen for å utrydde fattigdom, bekjempe ulikhet og stoppe klimaendringene innen 2030. Planen består av 17 mål og 169 delmål som har som hensikt å fungere som en felles global retning for land, næringsliv og sivilsamfunn. Dette er mål som Norge som nasjon har forpliktet seg til å bidra med å nå, og er godt i gang med etter at en handlingsplan ble vedtatt på Stortinget 5. april 2022 [5]. Når slike tiltak blir innført nasjonalt, vil det videre påvirke både regionalt og kommunalt. Oslo kommune har derfor satt seg som mål at byen innen 2030 skal fjerne 95 % av klimagassutslippene de hadde i 2018. Dette har ført til at det blir stilt strenge krav til all

industri og næring i Oslo kommune, der alle aktører som driver i området må bidra mot å nå målene som er satt.

Oslo kommune har derav satt et mål om at Oslo Havn skal kutte utslippene i perioden 2018 til 2030 med 85 %, og på sikt bli utslippsfri. Målet for 2030 inkluderer også at all drift av transport på land skal være elektrisk drevet istedenfor fossilt. For å nå målet vil det også måtte være tilgjengelig landstrøm til alle typer skip, og skipene må kunne seile utslippsfritt [6]. Oslo Havn må derfor forsøke å takle overgangen til å bli en nullutslippshavn, samtidig som de vil opprettholde produktiviteten og kapasiteten i havnen som var en av de tre mest effektive havnene i Norden i 2021 [7]. Oslo Havn har allerede innført kraner som drives av elektrisk energi. Et av de neste stegene mot en utslippsfri havn er å ta i bruk containertrucker som drives av fornybar energi. Disse maskinene, som på fagspråket omtales som reachstackere, utfører arbeidet som går på å flytte containerne på havna i de områdene kranene ikke har mulighet til å nå. I denne rapporten vil begrepet reachstacker bli brukt istedenfor containertruck. Både reachstacker og containertruck er engelske begreper, men containertruck er mest allmens kjent. Reachstacker er det faglige begrepet som blir brukt i industrien. Dette er grunnen til at begrepet reachstacker ble valgt istedenfor containertruck i denne rapporten.

1.3 Problemstilling

I de kommende årene skal essensielle kjøretøy på Oslo Havn byttes ut fra å være fossilt drevet til å bli elektriske. Det er derfor viktig å forsøke å finne den beste mulige løsningen, hvor de elektriske kjøretøyene på Oslo Havn klarer å opprettholde dagens behov. Denne rapporten vil ta for seg utskiftningen av fem fossile reachstackere på Sjursøya containerterminal. Disse har kapasiteten til å arbeide tilnærmet kontinuerlig, i motsetning til elektriske reachstackere, som må stoppe arbeidet for å lade.

Problemstillingen til denne rapporten er:

Er det mulig å erstatte dagens fem fossile reachstackere med elektriske, og samtidig ivareta arbeidskapasiteten?

1.4 Delmål og begrensninger

Det er utarbeidet delmål som vil bidra med å finne en løsning for problemstillingen på en systematisk og oversiktlig måte.

Delmål 1: Analysere dagens driftsbehov over til elektrisk behov og regne ut dagens behov opp mot de tilgjengelige batteripakkene. Undersøke batteripakkene sin kapasitet og ytelse ved forskjellige forhold

Delmål 2: Forsøke å bestemme batteristørrelser og antall maskiner, basert på info fra delmål 1.

Delmål 3: Undersøke konsekvensene av en overgang til elektriske reachstackere.

Begrensninger og antagelser:

- Det er kun tatt utgangspunkt i utskiftningen av de fem reachstackerene som er i drift på Oslo Havn i dag. Overgangen til elektriske reachstackere er den løsningen som er sett på, og blitt vurdert til å være mest aktuell.
- Etter samtaler med Oslo Havn, kom det frem at nettinfrastrukturen ved containerhavna hadde nok kapasitet til å kunne levere strøm til eventuelle ladestasjoner.

1.5 Rapportens oppbygning

Denne rapporten er bygd opp slik at den begynner med en innledning og teori. Disse delkapittelene gir en god oversikt over hva rapporten omhandler og nødvendig informasjon som trengs for å forstå innholdet. Deretter kommer det en metode og resultat del. Her kommer det frem hvordan de forskjellige løsningene er utarbeidet, hvilke faktorer som spiller inn og utfallet av de ulike løsningene. I diskusjonsdelen vil resultatene diskuteres og det drøftes rundt de utfallene som er presentert i resultatdelen. Til slutt vil rapporten avsluttes med en konklusjon.

2 Teori

Denne rapporten omhandler hovedsakelig overgangen fra fossilt drevne reachstackere til elektrisk drevne reachstackere. Det er derfor viktig å forstå grunnleggende informasjon om reachstackerene og hvordan elektriske kjøretøy fungerer. I dette kapitlet vil det bli gitt informasjon som vil gi nok kunnskap for å kunne forstå rapporten.

2.1 Reachstackere

Reachstackeren har en kritisk funksjon for driften på Oslo Havn, og for at Oslo Havn skal fungere slik den gjør idag må det være reachstackere i drift. Oslo Havn er hovedsaklig avhengig av tre forskjellige typer kjøretøy for å kunne holde driften i gang: kraner, terminaltrucker og reachstackere. Reachstackeren benyttes for å løfte og stable containere i områder der kranene ikke har mulighet.

I figur 2 er det en fossil reachstacker på venstre side og en elektrisk reachstacker på høyre side. Utseendemessig vises det fra figuren at det er veldig lite forskjell mellom en fossil reachstacker og en elektrisk reachstacker.



(a) fossil reachstacker [8]



(b) elektrisk reachstacker [9]

Figur 2: Reachstackere

2.2 Reachstackere på Sjursøya containerterminal

I dag er det fem fossile reachstackere i drift på containerterminalen. De er av to forskjellige typer, med forskjellig bruksområde. Det er tre reachstackere som brukes til å flytte fullstede containere, med maksimal løftekapasitet på 45 tonn. Disse omtales ofte i denne rapporten som RS. I tillegg til tre RS, brukes to mindre reachstackere til å flytte tomme containere. Disse har maksimal løftekapasitet på 10 tonn, og omtales ofte i denne rapporten som “empty handler”, forkortet EH. Tabell 1 viser en oversikt oversikt over de fem reachstackerene.

Tabell 1: Oversikt over dagens fossile reachstackere

Navn	Løftekapasitet	Modellnummer	Motor
RS1	45 tonn	DRG 450 65S5E	Volvo TAD 883 VE
RS2	45 tonn	DRG 450 65S5E	Volvo TAD 883 VE
RS3	45 tonn	DRG 450 65S5E	Volvo TAD 883 VE
EH1	10 tonn	DRG 100 54S6	Volvo TAD 871 VE
EH2	10 tonn	DRG 100 54S6	Volvo TAD 871 VE

2.3 Elektrisk reachstacker

Den elektriske reachstackeren er laget så lik den fossil-drevne som mulig, så funksjonene og bruksområdet endres ikke fra den diesel-drevne reachstackeren. Den har en løftekapasitet på opp til 45 tonn og kan per dags dato utstyres med fire forskjellige batteripakker, fra 245 kWh til 587 kWh. Med unntak av energikilden, er de fossile og elektriske maskinene nesten like i utforming og størrelse. Med personbiler som sammenligningsgrunnlag, er det naturlig å anta at elektriske reachstackere er tyngre enn fossile, men dette stemmer ikke. Selv om kombinasjonen elmotor/batteri er mye tyngre enn fossilmotor/drivstoff, har ikke dette særlig mye betydning for totalvekten til maskinene. Dette er fordi maskinene har store ballaster nær bakken, for å kunne løfte tunge containere uten å velte. En elektrisk reachstacker vil derfor kun ha mindre behov for ballast (med batteriet montert nær bakken), men vil veie omtrent like mye som en fossil. For kontekst, et bestemt 600 kWh batteri (587 kWh er det største Kalmar tilbyr) veier ca. 4 tonn [10]. Dagens reachstackere på Sjursøya veier ca. 70 tonn.

2.4 Valg av leverandør

Å velge riktig produsent for å få den reachstackeren som oppfyller kravene på best mulig måte er viktig. Det er flere store produsenter av reachstackere på verdensbasis, Kalmar er en av disse. Oslo Havn har allerede fem reachstackere fra denne produsenten, og har brukt disse for å oppnå de gode resultatene de har gjort de siste årene. I tillegg til at Oslo Havn allerede har Kalmar innplantert i maskinparken sin er også den svenske produsenten en av bedriftene som har kommet lengst i utviklingen av elektriske reachstackere. Dette førte til at Kalmar var den første produsenten til å avtale leveranser av elektriske reachstackere til havner i Sverige og Norge, forholdsvis til Helsingborg havn og Risavika utenfor Stavanger. Dette i tillegg til at det er lite informasjon å hente om de få andre elektriske reachstackerene på markedet fører til at kun Kalmar sine elektriske reachstackere blir vurdert i denne oppgaven.

2.5 Litium-ionbatterier (Li-ion)

Litium er det letteste metallet, og det tredje letteste grunnstoffet [11]. I tillegg har elementet høy spesifikk energi (J/kg). Litium er derfor godt egnet til energilagring. Li-ion batterier har

høyest energitetthet av alle oppladbare batterier, og brukes til alt fra forbrukerelektronikk til elbiler [12].

Litium-ion-batteriet fungerer på ion bevegelser mellom de positive og de negative elektrodene. En slik mekanisme burde fungere for alltid i teorien, men forhøyet temperatur, aldring, og batteri syklus reduserer ytelsen over tid [13].

Litium-ion batteriet fungerer mest effektivt i området mellom 20 % og 80 %. Det kan være skadelig for litium-ion batteriet å lade ut fullstendig, og lade opp batteriet til 100 % hver gang man lader. Ved gjentatte utladninger og fullladninger kan batteriet få redusert kapasitet [14]. Derfor bør ikke batteriladningen gå under 20 % og ikke bli ladet dersom batteriet er på 80 % eller høyere ladningsnivå.

2.5.1 Temperatur

En ulempe med li-ion batterier er det smale temperaturområdet. Det fungerer best i området mellom 0 °C og 40 °C. Ved lavere temperatur vil energitettheten i batteriet avta, og ladeeffekten reduseres [12]. Dette er et viktig punkt å huske på, ettersom dette prosjektet finner sted utendørs på en containerhavn i Oslo.

2.5.2 Batteritemperatursystem

Batteripakken til Kalmars elektriske reachstackere fungerer optimalt ved 20-25 °C. Maskinene er utstyrt med et system som varmer eller kjøler batteriene til denne temperaturen når omgivelsestemperaturen er utenfor dette området. Dette systemet fungerer når omgivelsestemperaturen er mellom -30 °C og 40 °C. Det antas at det ikke blir så mye varmere enn 25 °C i Oslo, så de store forskjellene mellom optimal temperatur og omgivelsestemperatur vil forkomme på vinteren. Hvor mye energi systemet bruker ved ulike omgivelsestemperaturer er ikke oppgitt i datablad. Det kunne heller ikke besvares av en Region Sales Manager som ble kontaktet i Kalmar.

2.6 CCS-lading

CCS er en forkortelse for Combined Charging System eller kombinert ladesystem, og er en løsning for DC hurtiglading. CCS kalles for kombinert ladesystem fordi kontakten på bilen brukes til både daglig AC lading og DC hurtiglading. Den øverste delen av kontakten i figur 3 er en Type 2 kontakt for AC lading og den nederste delen i figur 3 har to pinner som brukes ved DC hurtiglading [15].



Figur 3: CCS lader [16]

Ved å bruke de to forskjellige kontaktene i figur 3 kan CCS gi effekt opptil 350 kW [17]. Kort forklart, når en bruker en hurtiglader, bruker pluggen begge portene som vises i figur 3. Den øverste delen som har tre pinner kommuniserer med kjøretøyet, mens den nederste delen med to pinner transporterer strømmen [18].

2.7 Konduktiv lading

Konduktiv lading erstatter ledende ledninger som ligger mellom lader og ledende enhet med ledende kontakter. Dette er ledende kraftoverføring som fungerer med en ladeinfrastruktur. Ladeinfrastrukturen er i form av en skinne som leverer ladestrømmen til en ladeenhet som er utstyrt med en pickup eller passende mottaker. Infrastrukturen må da godkjenne om mottakeren er gyldig, om den er gyldig slås infrastrukturen på og strømmen blir da overført til mottakeren [19].

2.8 Dieselmotorer

Virkningsgrad i dieselmotoren er forholdet mellom tilført kjemisk energi til motoren, og levert bevegelsesenergi til akslingen. Virkningsgraden varierer blant annet med størrelsen på motoren, turtallet, motorens konstruksjon og last på akslingen. Virkningsgraden til dieselmotoren i en personbil ligger mellom 30 % og 45 % [20].

En liter diesel inneholder ca. 38 MJ kjemisk energi, avhengig av hvordan den er produsert [21]. Fordi volumet er avhengig av temperatur, er også energiinnholdet per volum avhengig av temperatur. Volumet endres med 0,085 % per °C [22].

3 Metode

Dette kapittelet beskriver hvordan de fossile reachstackere kan sammenlignes med elektriske, og hvilke beregninger som må til for å utregne effektbehovet til de elektriske reachstackerene. Videre blir fremgangsmåten for hvordan informasjon er innhentet og tatt i bruk gjennomgått.

3.1 Sammenligning av elektrisk og fossil

Fra problemstillingen lå det til grunn at dagens fossile reachstackere forsøksvis skulle erstattes med et ukjent antall elektriske, med ukjente batteristørrelser. Antallet var ukjent, grunnet vesensforskjellen mellom elektriske og fossile reachstackere. Nemlig at de elektriske måtte tas helt ut av drift i lengre perioder for å lade. Derfor kunne det ikke umiddelbart fastslås om fossile og elektriske reachstackere kan erstattes en-til-en. Det ble derfor forsøkt å bestemme hvor mye *arbeid* de fossile utførte i løpet av en arbeidsdag. Deretter var det mulig å bestemme hvor mange elektriske (med bestemte batteristørrelser) som var nødvendig for å utføre samme mengde arbeid. I tillegg til å utføre like mye arbeid, måtte de elektriske utføre like mye arbeid *per tid*. Eksempel: hvis de fossile kunne utførte en dags arbeid på $n \cdot \text{timer}$, og de elektriske erstatningene kunne utføre samme mengde arbeid på $2n \cdot \text{timer}$, ville de ikke ha samme arbeidskapasitet. Det ble derfor nødvendig å se på energiforbruket over kortere perioder. I videre beregninger benyttes gjennomsnittlig effekt P i løpet av en time.

Det ble lagt til grunn at effektforbruket til fossile reachstackere består av tre deler:

1. Bevegelseeffekt som gikk med til å løfte containere. Dette forble uendret mellom elektriske og fossile.
2. Bevegelseeffekt som ble brukt til kjøring. Fordi de fossile og elektriske veide omtrent like mye (som beskrevet i delkapittel 2.3) ble det antatt likt forbruk her også.
3. Diverse andre systemer på maskinen. Kupevarmer, lys, sensorsystem etc. Dette ble ansett som svært lite sammenlignet med punkt 1 og 2, og ble derfor neglisjert.

Altså, det totale effektforbruket til fossile reachstackere var lik bevegelseeffekt, i form av kjøring og containerløft. Fordi dette antas å være likt for fossile og elektriske, kunne bevegelseeffektbehovet for elektriske beregnes med følgende likning:

$$P_{fossil} = P_{elektrisk} \quad (1)$$

Der P er gjennomsnittlig effekt over en time. I motsetning til fossile, kunne ikke det totale effektforbruket for elektriske antas å være likt bevegelseeffekt. Dette grunnet batteritemperatursystemet, som beskrevet i delkapittel 2.5.2. Systemet bruker effekt fra batteriet for å holde temperaturen i batteriet mellom $20 \text{ }^\circ\text{C}$ og $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Det totale effektforbruket ville øke når dette var i drift. For å ta hensyn til dette ble faktoren k_1 ganget med bevegelseeffektforbruket. Mer om dette kommer i delkapittel 3.2.1. Dermed ble likningen for totalt elektrisk effektforbruk:

$$P_{total,elektrisk} = P_{elektrisk} \cdot k_1 \quad (2)$$

3.2 Effektberegning

For å beregne effektforbruket til fossile reachstackere var det nødvendig å vite tre størrelser:

1. Kjemisk energi per liter diesel u , med enhet J/l
2. Dieselforbruk per time v , med enhet l/h
3. Virkningsgrad for motoren til fossile reachstackere η

Herfra var det mulig å beregne gjennomsnittlig effekt med følgende formel:

$$P_{fossil} = \frac{v \cdot u \cdot \eta}{3,6 \cdot 10^6} [kW] \quad (3)$$

Med substitusjoner i likning (1), (2) og (3) kunne effektbehovet for elektriske reachstackere uttrykkes med følgende formel:

$$P_{total,elektrisk} = \frac{v \cdot u \cdot \eta \cdot k_1}{3,6 \cdot 10^6} [kW] \quad (4)$$

Variablene i likning (4) måtte nå bestemmes, for å beregne effektbehovet. Uheldigvis medførte alle fire variablene usikkerhet. I de neste delene forsøkes det å bestemme tallverdier for variablene, i tillegg til et usikkerhetsområde. I delkapittel 3.3 ble alle variablene sammenstilt i en usikkerhetsanalyse, for å vurdere hvor mye usikkerheten i hver variabel påvirket resultatet.

3.2.1 Batteritemperatursystem

Faktoren k_1 ville være lik 1 når omgivelsestemperaturen var lik den ideelle batteritemperaturen, og systemet ikke trengte å være i drift. Ved temperaturer utenfor det ideelle området ville den blitt høyere enn 1. Når temperaturforskjellen økte mellom ideell og omgivelse, ville k_1 øke. Dette ble mest aktuelt om vinteren da denne forskjellen kunne bli svært stor, og mye varmeeffekt måtte tilføres batteriet.

I en test utført av Norges Automobil Forbund i 2022, vises det at elbiler mister mellom 4 og 30 prosent av rekkevidden sin, selv i milde vintertemperaturer. I tillegg påvirkes ladehastigheten [23]. Det er usikkert om elbiler og reachstackere er direkte sammenlignbare, men grunnet mangel på annen informasjon, brukes denne testen som grunnlag. Altså ble usikkerhetsområdet for k_1 1,04 til 1,3. I simuleringer ble det brukt $k_1 = 1,2$

3.2.2 Dieselforbruk

For å bestemme dieselforbruk per time, trengtes det kjøredata for fossile reachstackere. Dette ble tilsendt på e-post 09.02.2023 av Manager hos Yilport. Tabell 2 viser kjøredata for RS/EH over en periode på to måneder. Det ble også oversendt data for dag-for-dag kjøredata i samme periode. Dette ble mottatt på e-post 24.03.2023 av Equipment Maintenance Manager hos Yilport.

Tabell 2: Kjøredata for fem fossile reachstackere i perioden 01.11.2022 - 31.12.2022 [24]

	Drivstoff- forbruk [liter]	Driftstid [timer]	Tomgangs- tid [timer]	Aktiv arbeids- tid [timer]	Antall løft	Tilbakelagt strekning [km]
EH1	3 064.91	326.60	156.64	169.96	4650	871.15
EH2	2 890.71	383.14	199.03	184.11	4550	816.32
RS1	3 781.31	508.46	175.97	332.49	4060	896.62
RS2	5 087.21	495.58	242.95	252.63	6141	1 244.16
RS3	5 094.54	503.53	269.42	234.11	5928	1 271.10

Data fra tabell 2 ble brukt for å regne ut gjennomsnittlig drivstofforbruk for hhv. RS og EH. Der RS er RS1-RS2-RS3, og EH er EH1-EH2. Resultatet vises i tabell 3. Tabellen viser også forbruket oppgitt i databladene til reachstackerene. Det merkes at gjennomsnittsforbruket til RS på 9,26 l/h er lavere enn det minste forbruket på 10 l/h oppgitt i datablad. Fra dag-til-dag rapportene fremkom det at drivstofforbruket per time varierte fra dag til dag. Det høyeste forbruket for RS var 07.12.2022, da RS1 brukte 13.66 l/h. Det høyeste forbruket for EH var 02.12.2022, da EH1 brukte 12,18 l/h. Disse var de høyeste forbrukene som oppstod i perioden, der kjøretiden var lengre enn 3 timer. Disse verdiene blir brukt som øvre grense i usikkerhetsområdet. En forklaring på variasjonene kan være vekten til containerene (mer aktuelt for RS enn EH), eller hvor intensiv arbeidsøkten var (antall løft/driftstid). Det lave gjennomsnittsforbruket kan skyldes mange dager med lite intensivt arbeid. Grunnet dette, velges utregnet gjennomsnittsforbruk som nedre grense i usikkerhetsområdet.

Det ble valgt 12 l/h som grunnlag for RS i simuleringene. Dette var ca. 30 % høyere enn utregnet gjennomsnitt for RS, og ca. 10 % lavere enn maksimalt avlest forbruk. Det ble ansett som ekstra viktig å legge inn gode marginer for RS, da disse kunne løfte fullastede containere på opp til 45 tonn. Altså kunne det være dager der RS hadde mye høyere energiforbruk enn gjennomsnittet, grunnet tung last.

Det ble valgt 10 l/h som grunnlag for EH i simuleringene. EH løfter kun tomme containere, hvilket kan antas medfører mindre variasjon i energiforbruket. Derfor ble det valgt en margin på ca. 20 % høyere forbruk enn gjennomsnittet, og ca. 20 % lavere enn maksimalt avlest forbruk.

Tabell 3: Dieselforbruk for RS og EH.

	RS	EH
Forbruk hentet fra datablad [l/h]	10-15	7-14
Utregnet gjennomsnittlig forbruk [l/h]	9,26	8,39
Maksimalt avlest forbruk [l/h]	13,66	12,18
Valgt forbruk for simuleringer [l/h]	12	10

3.2.3 Virkningsgrad

For å anslå virkningsgraden til dieselmotorene, ble det tatt utgangspunkt i delkapittel 2.8. Slik det forstås, kan det ikke gis en motor en konkret tallverdi for virkningsgraden, uten å vite mer om systemet den er en del av. Hverken databladene til RS/EH eller dieselmotorene, nevnte virkningsgrad. Derfor ble usikkerhetsområdet 30 % til 45 %. Valgt verdi for simuleringen ble $\eta = 0,35$.

3.2.4 Kjemisk energi i diesel

For energi per liter diesel ble det benyttet $u = 38 \text{ MJ/l}$. Verdien er hentet fra delkapittel 2.8, der forholdet mellom temperatur og volum (og dermed energitetthet) også ble beskrevet. Fordi datagrunnlaget kun inneholdt volum ved ukjent temperatur, ble dette en usikkerhet. Denne usikkerheten var liten, 20 °C endring i temperatur utgjorde 1.7 % endring i volum. Med denne usikkerheten, samt usikkerhet om raffineringsgraden til drivstoffet, ble usikkerhetsområdet satt til $38 \text{ MJ/l} \pm 3\%$

3.3 Sammenstilling av usikkerheter

Tabell 4 viser en oversikt oversikt over usikkerhetsområdene til variablene i likning (4), samt valgte verdier for simulering. For valgte verdier innsatt i likningen, ble effektforbruket for hhv. RS og EH, 53.2 kW og 44.3 kW.

Tabell 4: Oversikt over usikkerhetsintervallene til variablene som inngår i effektforbruket til elektriske reachstackere

Variabel	Beskrivelse	RS/EH	Usikkerhetsintervall	Valgt verdi for simulering
u [MJ/l]	Kjemisk energi	RS	36,85 - 39,14 MJ/l	38 MJ/l
		EH	36,85 - 39,14 MJ/l	38 MJ/l
v [l/h]	Dieselforbruk	RS	9,26 - 13,66 l/h	12 l/h
		EH	8,39 - 12,18 l/h	10 l/h
k_1	Batt.temp.sys	RS	1 - 1,3	1,2 (vinter)
		EH	1 - 1,3	1,2 (vinter)
η	Virkningsgrad	RS	0,3 - 0,45	0,35
		EH	0,3 - 0,45	0,35

Det var ønskelig å beregne hvor mye usikkerheten i hver variabel påvirket resultatet. Ved å ta absoluttverdien til den partiellderiverte av likning (4) med hensyn på ønsket variabel, bergnes følsomhetsfaktoren $\frac{\partial P}{\partial x_i}$ til variabelen. Videre kan utslaget ved grensene av usikkerhetsområdet bestemmes med følgende likning:

$$\text{Prosentvis utslag} = \Delta x_i \cdot \frac{\left| \frac{\partial P}{\partial x_i} \right|}{P_{nom}} \cdot 100 \% \quad (5)$$

Der Δx_i er forskjellen mellom valgte verdier for simulering, og grenseverdiene for usikkerhetsområdet. P_{nom} er effekten ved valgte verdier fra tabell 4. I tabell 5 vises resultatene av denne beregningen, for alle fire variabler i likning (4).

Fra tabellen vises det at usikkerheten for energiinnholdet i diesel ikke ville få stor betydning for nøyaktigheten i resultatet. Virkningsgraden til motorene derimot, kunne gi store utslag i begge retninger. Det hadde vært ønskelig å innsnevre usikkerhetsområdet her for å forbedre kvaliteten på resultatene.

I motsetning til virkningsgrad og kjemisk energi, var dieselforbruket varierende, og det måtte velges en verdi. Dermed ville det bli usikkerhet uansett hvilken verdi som ble valgt. Her lå det nok informasjon til grunn for å gjøre gode antagelser, som beskrevet i delkapittel 3.2.2.

Usikkerheten for forbruket i batteritemperatursystemet ville være avhengig av utetemperatur. Det ville være null usikkerhet når det ikke var aktivt, men høyere usikkerhet desto større avviket ble mellom ideell batteritemperatur og utetemperatur.

Tabell 5: Endring i effektforbruk ved største og minste verdi i usikkerhetsområdet

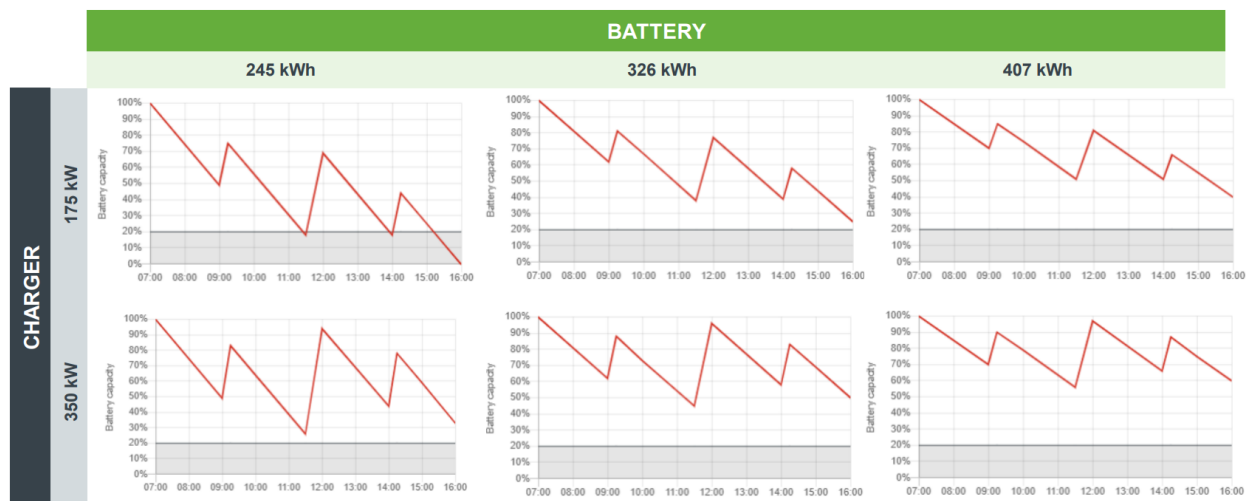
Variabel	Beskrivelse	Type	Følsomhetsfaktor	Utslag ved minste verdi i usikkerhetsintervall	Utslag ved største verdi i usikkerhetsintervall
u [MJ/l]	Kjemisk energi	RS	1,40	-3,0 %	3,0 %
		EH	1,17	-3,0 %	3,0 %
v [l/h]	Dieselforbruk	RS	4,43	-22,8 %	13,8 %
		EH	4,43	-16,1 %	21,8 %
k_1	Batt.temp.sys	RS	44,3	-16,7 %	8,3 %
		EH	36,9	-16,7 %	8,3 %
η	Virkningsgrad	RS	152	-14,3 %	28,6 %
		EH	127	-14,3 %	28,6 %

3.4 Lading, batteri og ladesyklus

Med CCS-lading som beskrevet i delkapittel 2.6 var maksimal ladeeffekt 350 kW [25]. Dette var ladeeffekten som ble valgt for videre arbeid. Det var mulig å justere denne i senere beregninger, ved å gange med korreksjonsfaktoren k_2 . Det ble antatt at ladeeffekt sank med 10 % under pessimistiske forhold.

Kalmar tilbyr reachstackere med fire forskjellige batteristørrelser: 245 kWh, 326 kWh, 407 kWh og 587 kWh. Disse størrelsene var de som kunne velges mellom i senere beregninger. Korreksjonsfaktoren k_3 ble benyttet for å modellere reduksjon av batterikapasitet.

Figur 4 viser vilkårlige ladesykluser som ble hentet fra Kalmar-brosjyre [26]. Det var ønskelig å forsøke å fremstille slike grafer, som var skreddersydde for reachstackerene på Sjursøya. Hvis det kunne utføres, kunne det bidra til å underbygge en påstand om at elektriske reachstackere kunne erstatte fossile.



Figur 4: Eksempel på ladesykluser fra Kalmar [26]

Forbruket beskrevet av likning (4) tilsvarer linjene i grafene med negativt stigningstall. Linjene med positivt stigningstall er simpelthen ladeeffekt over tid. Med tallverdier for alle variablene, var datagrunnlaget på plass for å fremstille grafer for ladesykluser.

Tidlig i arbeidet ble det forsøkt å plote grafene i MS Excel. Det ble regnet ut stigningstall for grafene, og skrevet inn som koordinatpar i tabeller. Denne metoden var lite fleksibel og svært tidskrevende, da arbeidet måtte utføres på nytt ved endringer i variabler.

Det var ønskelig å undersøke mange ulike tilfeller, med ulike batteristørrelser, antall maskiner, forskjellig forbruk, turnus, etc. Dette viste seg å være tungvint å utføre manuelt. Det var nødvendig med et bedre verktøy, som kunne gjøre simuleringer automatisk.

3.5 Simulering i Python

Programmeringsspråket Python ble benyttet til å skrive et simuleringsprogram. Koden er vedlagt i sin helhet i vedlegg. For å benytte programmet, ble det gitt tallstørrelser til variablene beskrevet i tabell 6.

Tabell 6: Variabler i Python-kode

Variabel	Enhet	Beskrivelse	Variabelnavn i kode
η		Virkningsgrad, dieselmotor	virkningsgrad_dieselmotor
u	J/l	Energi per liter diesel	energi_per_liter_diesel
v	l/h	Dieselforbruk per time	liter_per_time_forbruk
Ladeeffekt	kW	Nominell ladeeffekt	kwhhlading
Batteripakke	kWh	Nominell batterikapasitet	batteri_nominell
k1		Økt forbruk, temperatursystem	ekstra_vinterforbruk
k2		Korreksjonsfaktor, ladeeffekt	ladereduksjon
k3		Korreksjonsfaktor, batterikapasitet	batteri_slitasje

Deretter skrives det inn ønsket turnus. Dette gjøres ved å skrive inn starttidspunkter for kjøring, og starttidspunkter for lading. Hvis programmet ble kjørt med overnevnte variabler, ble resultatet en graf for batteristatus i prosent, som funksjon av tid. Grafen ville knekke og flate ut på 0 % og 100 % batteriladning. Plottet kunne også dupliseres, med forskyvninger i x-retning. Dette var nødvendig for å simulere hele flåten med ELRS/ELEH.

Alle grafene som presenteres i resultater (kapittel 4) ble laget ved hjelp av dette programmet. Det må presiseres at dette programmet kun var ment som et internt verktøy for å produsere grafer til denne rapporten. Koden kan klippes ut og kjøres av utenforsående, men kan lett bryte sammen, spesielt ved endring av turnus. I flere av grafene presentert i kapittel 4 har verdiene på x-aksen blitt fotoredigert utenfor Python, grunnet begrensede funksjoner i programmet. Likevel var programmet svært hjelpsomt med arbeidet i rapporten, men med rom for videreutvikling.

Det første forsøket som ble utført var en-til-en erstatning av reachstackerene. Det var nødvendig å vite hvilken skiftordning Yilport opererer med. Dette ble mottatt på e-post 23.02.2023 av Manager hos Yilport. Direkte sitat:

"I gatens åpningstid (06:00-17:00) er det kontinuerlig drift på reach stackere. Mellom 17:00 og 06:00 (samt i helgene) er det 4 timers kjøring og 45 minutters pause."

Dersom en en-til-en løsning ikke var mulig, ville det være nødvendig å bruke flere reachstackere. En eventuell løsning burde også testes under pessimistiske forhold, for å sikre driftsikkerhet. Resultater av simuleringene presenteres i kapittel 4.

3.6 Pris for elektriske reachstackere

En Region Sales Manager hos Kalmar Norway AS ble kontaktet 21. mars 2023 for å innhente informasjon om prisforskjellene på de ulike reachstackerene Kalmar leverer. Prisene som ble oppgitt er ca. pris i NOK, prisen er avhengig av kjøper og antall som blir kjøpt.

- Elektrisk reachstacker med batteripakke 326 kWh er 10 200 000 NOK, eks.mva.

- Elektrisk reachstacker med batteripakke 407 kWh er 11 040 000 NOK, eks.mva.
- Elektrisk reachstacker med batteripakke 587 kWh er 11 880 000 NOK, eks.mva.

Prisforskjellen mellom de ulike batterialternativene er stor. Store besparelser kan gjøres ved å velge mindre batteripakker. Denne rapporten hadde derimot som primærfokus å finne en løsning som fungerer best mulig. Økonomiske hensyn ble også vurdert, men i andre rekke.

3.7 Innhenting av erfaringer

I prosessen ved å undersøke overgangen fra fossilt drevne reachstackere til elektriske reachstackere er det forsøkt å komme i kontakt med havner som er i den samme situasjonen som Oslo Havn. Havner som er i den samme prosessen kan ha nyttige erfaringer som kan være til hjelp for å velge de beste løsningene. De aktuelle havnene som er kontaktet er Fredrikstad havn, driftet av Andersen & Mørck, Stavanger havn og Bergen havn, begge driftet av Westport.

For å få klare svar på likt grunnlag er de tre havnene blitt stilt de samme fem spørsmålene:

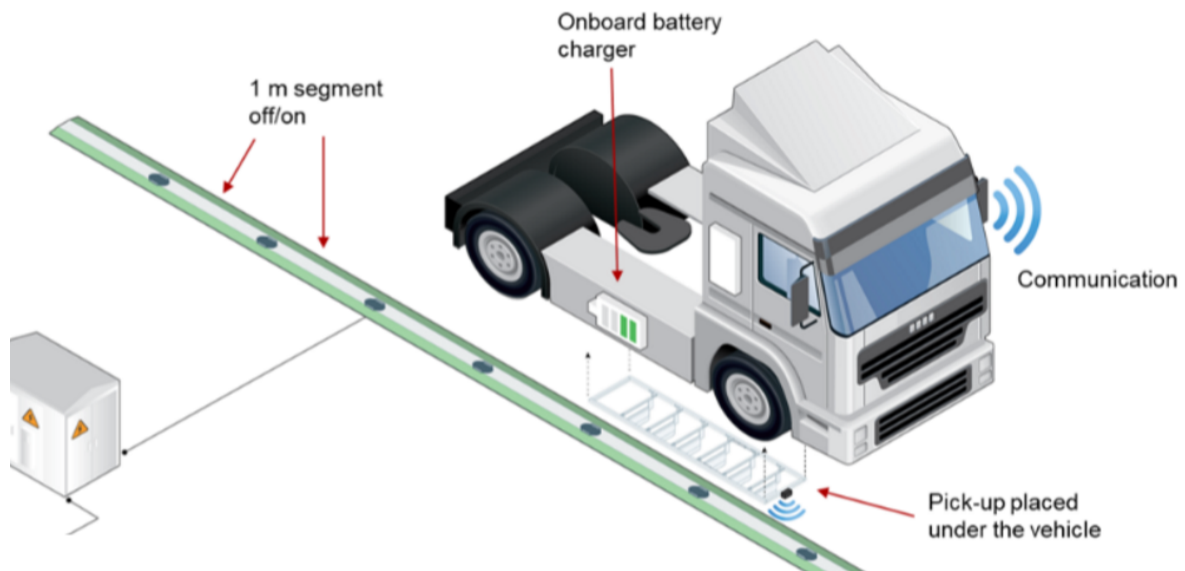
1. Hvor mange reachstackere har dere i drift på deres havn?
2. Hvor mange elektriske reachstackere har dere bestilt? Og hvor mange elektriske reachstackere er i drift idag?
3. Er planen å gå over til bare elektriske reachstackere? Isåfall: Hvor mange elektriske reachstackere kommer dere til å ha i drift i forhold til når det bare var fossilt drevne reachstackere?
4. Om dere har noen elektriske reachstackere i drift idag: Hvilke utfordringer har dere møtt ved å innføre elektriske reachstackere? Har det gått ut over driften på deres havn? Har dere erfart noe spesielt negativt eller spesielt positivt ved innføringen av elektriske reachstackere?
5. Om dere skal gå over til bare elektriske reachstackere: Må dere endre på arbeidstid/pauser for å tilrettelegge for lading av reachstackerene? Vil batterikapasiteten være en utfordring?

Svar på disse spørsmålene kommer i delkapittel 4.5.

3.8 Bruken av konduktiv lading

Gjennom samtaler med Oslo Havn kom det frem at en aktuell fremtidig løsning kan være å videreutvikle den elektriske overgangen ved å installere konduktive ladeskinner på Oslo Havn. Ut ifra samtalene har det blitt aktuelt å se på mulighetene for videreutvikling, og da spesielt løsningen som involverer konduktiv lading. Denne ladeløsningen er på lik linje med elektriske reachstackere i en utviklingsfase, der det ikke er satt en «standard» i markedet og utviklingen av produktet foregår fort. Dette gjør at det ikke er mulig å hente inn informasjon fra reelle erfaringer som er gjort, og all informasjon er derfor basert på data innhentet fra produsentene sine nettsider. Selskapet som er fremst i bransjen på teknologi knyttet til konduktiv lading

gjennom en ladeskinne i vegbanen er Elonroad, så majoriteten av informasjonen om løsningen er innhentet derfra.



Figur 5: Elonroad konduktiv ladeskinne [27]

Figur 5 viser hvordan den konduktive ladeskinnen fungerer. I avsnitt 2.7 blir konduktiv ladning med ladeskinne beskrevet i detalj.

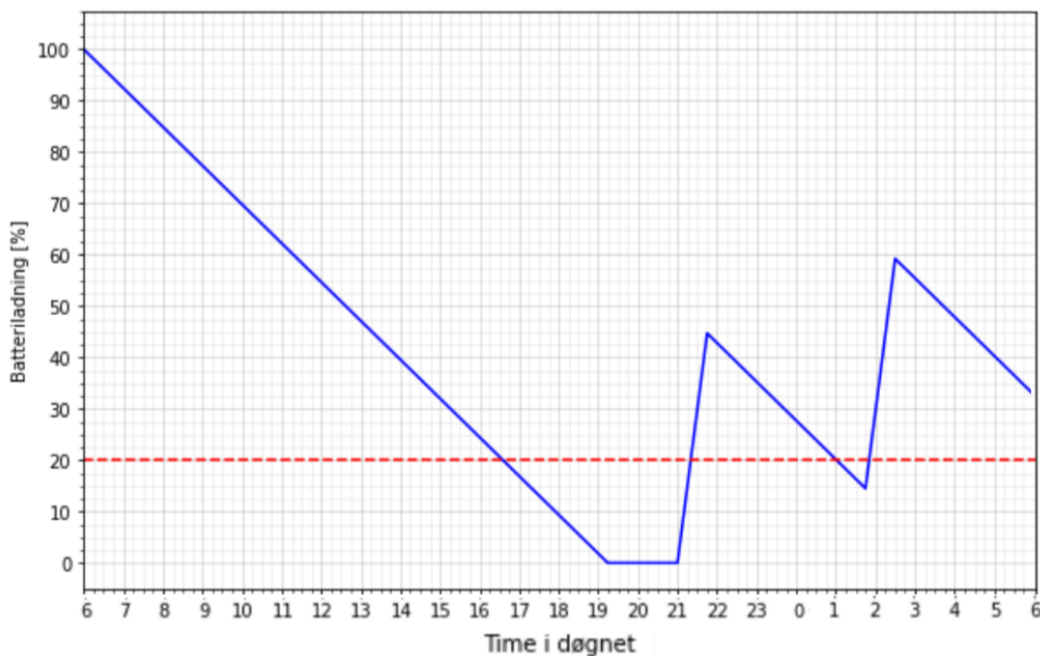
4 Resultater

Her presenteres resultater basert på simuleringer gjennomført i Python. Det ble simulert en-til-en erstatning av dagens antall reachstackere og andre løsninger som kan bidra til å erstatte dagens behov. Resultatene er lagt frem som grafer, som vil gi et godt bilde av hvordan de forskjellige løsningene vil fungere i et reelt tilfelle. Både ideelle og pessimistiske forhold ble tatt i betraktning. I dette kapitlet benyttes forkortelsene RS, EH, ELRS, ELEH i stor grad, se begrepsavklaring.

4.1 En-til-en erstatning

Det ble tatt utgangspunkt i skiftordingen fra delkapittel 3.5. Her ble den største tilgjengelige batteripakken benyttet, og ingen korreksjonsfaktorer ble tatt i bruk. Altså, batteritemperatursystemet er ikke aktivt, batterikapasiteten er nominell, og ladeeffekten er ikke redusert fra 350 kW.

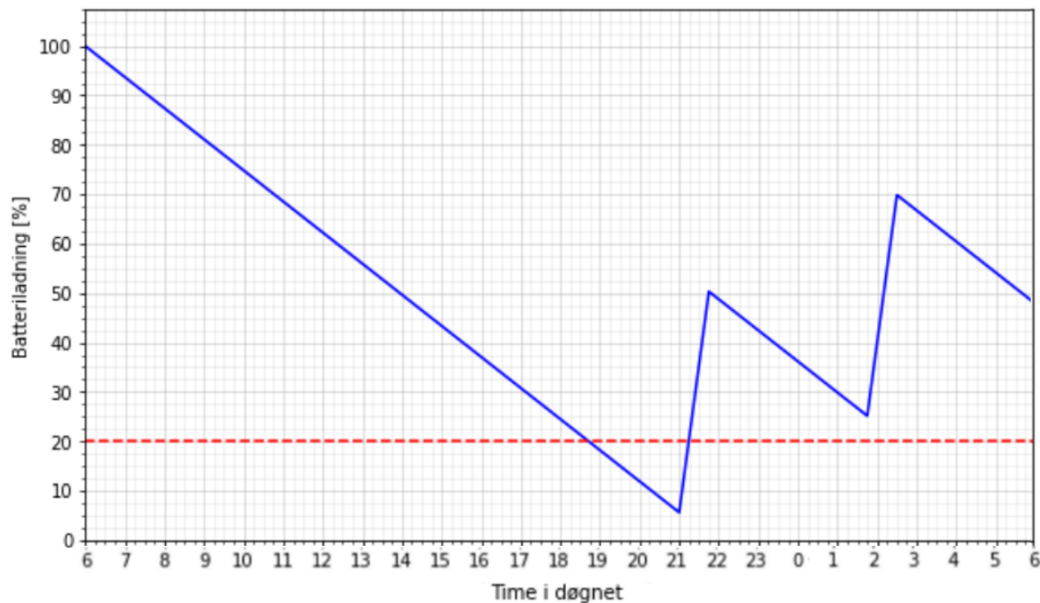
Figur 6 viser resultatet av simulasjonen for ELRS. Det kan vises fra grafen at en ELRS ville ha gått tom for energi i første kjøreperiode, og ville hatt en ladning på ca. 35 % på slutten av 24-timersperioden. Dermed kunne ikke syklusen gjentas neste dag, da den ikke ville begynne på 100 %.



Figur 6: ELRS, En-til-en erstatning med dagens turnus. 587 kWh batteri, korreksjonsfaktorer lik 1.

Figur 7 viser resultatet av simulasjonen for ELEH. Det kan vises fra grafen at ladningen

gikk under 10 % i første kjøreperiode, og endte på ca. 50 % på slutten av 24-timersperioden. Det eneste som ble endret sammenlignet med figur 6 var at dieselforbruket ble redusert fra 12 l/h, til 10 l/h. Energiforbruket ble som forventet lavere, og batteriladningen gikk ikke til null. Likevel kunne ikke syklusen gjentas neste dag.



Figur 7: ELEH, En-til-en erstatning med dagens turnus. 587 kWh batteri, korreksjonsfaktorer lik 1.

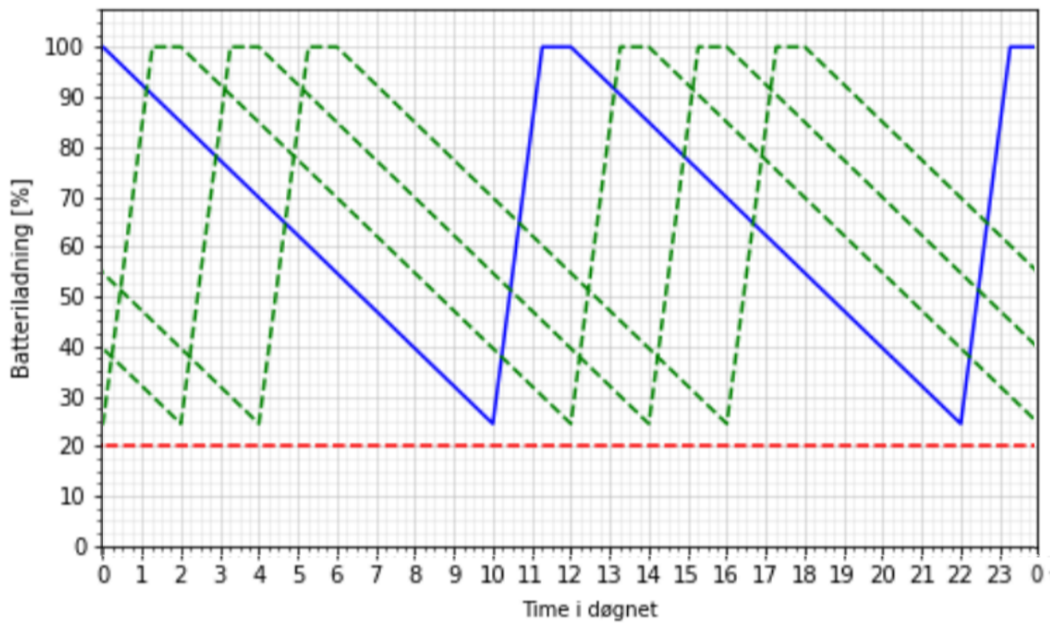
4.2 Optimistisk løsning

Fordi en-til-en erstatning ikke var tilstrekkelig, måtte det forsøkes å bruke flere kjøretøy. Med én ekstra ELRS (totalt 4), og én ekstra ELEH (totalt 3), kunne det utarbeides en plan som sørger for kontinuerlig drift av 3 ELRS, og 2 ELEH. Her ble det antatt optimistiske forhold, ingen korreksjonsfaktorer for batterislitajse, lave temperaturer eller treg lading.

I figur 8 og 9 vises et forslag til ladesykluser for hhv. 4 ELRS og 3 ELEH. For bedre leselighet ble det vist en graf i blått, og de andre i stiplede grønne. De grønne grafene ble tidsforskjøvet med $n_i \cdot \text{ladetid}$ fra den blå, der $n_i = \text{maskin}_i - 1$. Utenom dette er alle grafer i samme figur identiske, og representerer hver sin reachstacker. Tidsforskyvningen var nødvendig for å unngå at alle maskinene måtte tas ut av drift for å lade samtidig. Alle syklusene er periodisk sammenhengende, dvs. at de ender på samme ladningsnivå som de begynner. Dette ble oppnådd ved å bruke ladesykluser som er likt delelig med 24 timer. Dermed kan de gjentas daglig.

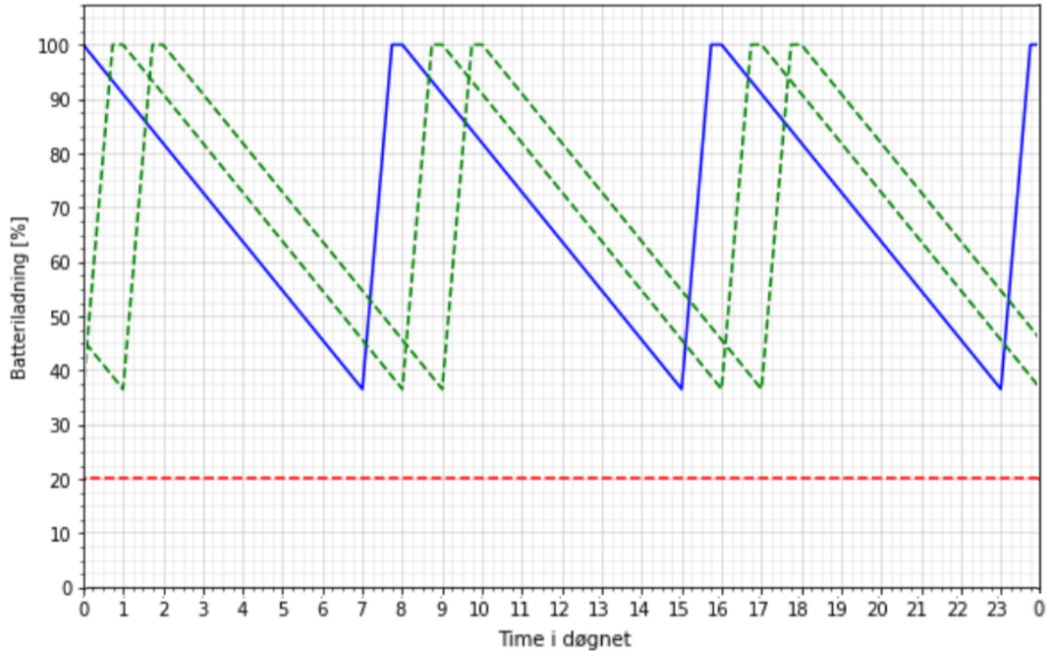
Figur 8 viser et forslag til lademønster for fire ELRS med 587 kWh batteripakke. To ladeperioder var tilstrekkelig for ett døgn. Ladetiden kunne vært redusert, ettersom batteriet

var fulladet etter litt over en time. En eventuell reduksjon av ladetid var derimot ikke som nødvendig, ettersom minimum tre maskiner alltid vil kunne være i drift.



Figur 8: Forslag til ladesyklus for fire ELRS, optimistisk tilfelle. 587 kWh batteri. 2 timer lading, 10 timer kjøring.

Fordi ELEH hadde lavere forbruk enn ELRS, kunne samme løsning som i figur 8 benyttes for ELEH, men med tre maskiner. For å gjøre økonomiske besparelser ble det forsøkt å redusere batteristørrelsen til ELEH. Figur 9 viser et forslag til lademønster for tre ELEH med 407 kWh batteripakke. Tre ladeperioder var tilstrekkelig for ett døgn, to ladeperioder (slik som i figur 8), var ikke tilstrekkelig. Med denne syklusen ville minimum to maskiner alltid kunne være i drift. Det ble vurdert at de økonomiske besparelsene for mindre batteripakker, var verdt den ekstra ladeperioden.

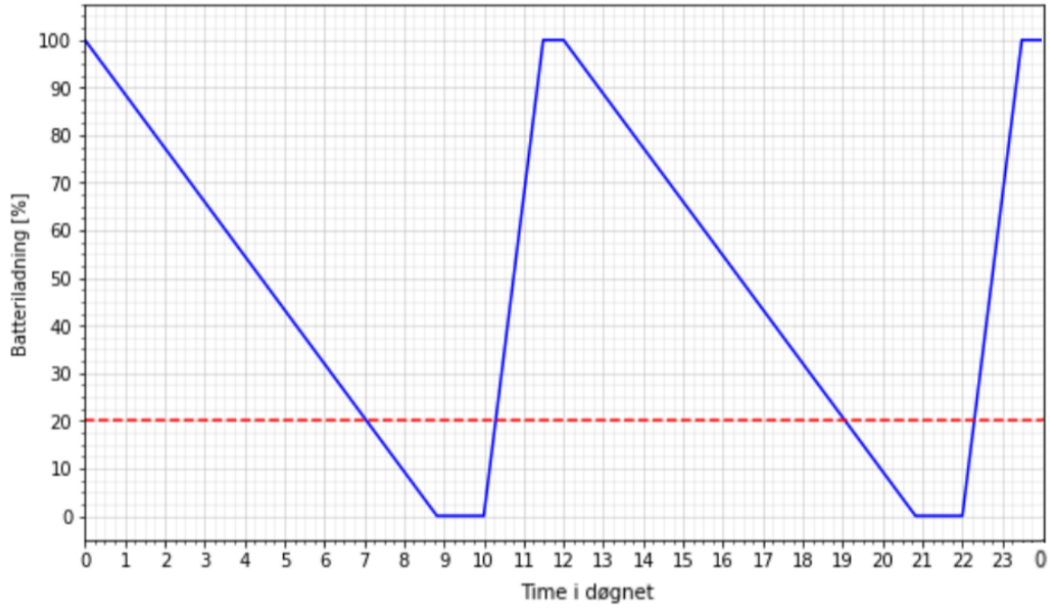


Figur 9: Forslag til ladesyklus for tre ELEH, optimistisk tilfelle. 407 kWh batteri. 1 time lading, 7 timer kjøring

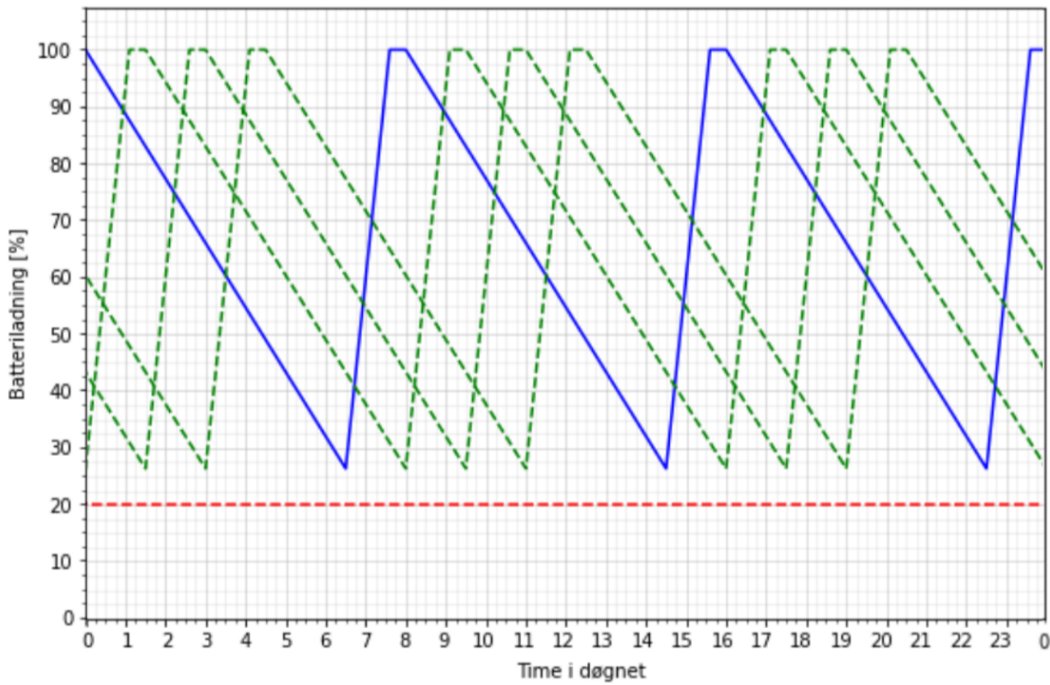
4.3 Pessimistisk løsning

I dette avsnittet ble det antatt at batterikapasiteten var redusert til 80 % av nominell verdi, som følge av mange ladesykluser, sent i levetiden til maskinene ($k_3 = 0.8$). Videre ble det antatt at batteritemperatursystemet økte totalforbruket med 20 % grunnet vinterforhold ($k_1 = 1.2$). Til slutt ble det antatt at ladeeffekten var redusert med 10 % fra 350 kW ($k_2 = 0.9$).

Figur 10 viser hvordan korreksjonsfaktorene påvirket en ELRS, med samme parametre og turnus som i figur 8. Det kan vises fra grafen at ladenivået ville kunne gå til 0 % i løpet av en kjøreperiode. Fordi ELRS brukte de største batteripakkene som er tilgjengelig (587 kWh), måtte kjøretiden reduseres. For at kjøretiden kunne reduseres var det nødvendig med en ekstra ladesyklus i løpet av døgnet. Figur 11 viser et forslag til ladesyklus for fire ELRS, med 587 kWh batteripakke.



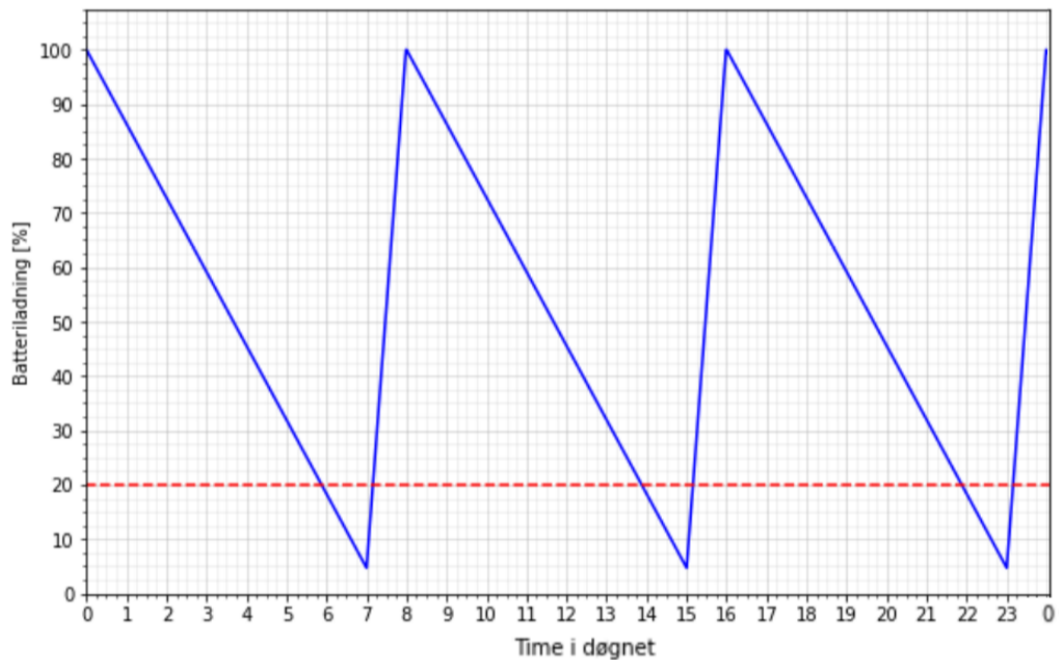
Figur 10: ELRS 587 kWh, korrigert for pessimistiske forhold. 2 timer lading, 10 timer kjøring



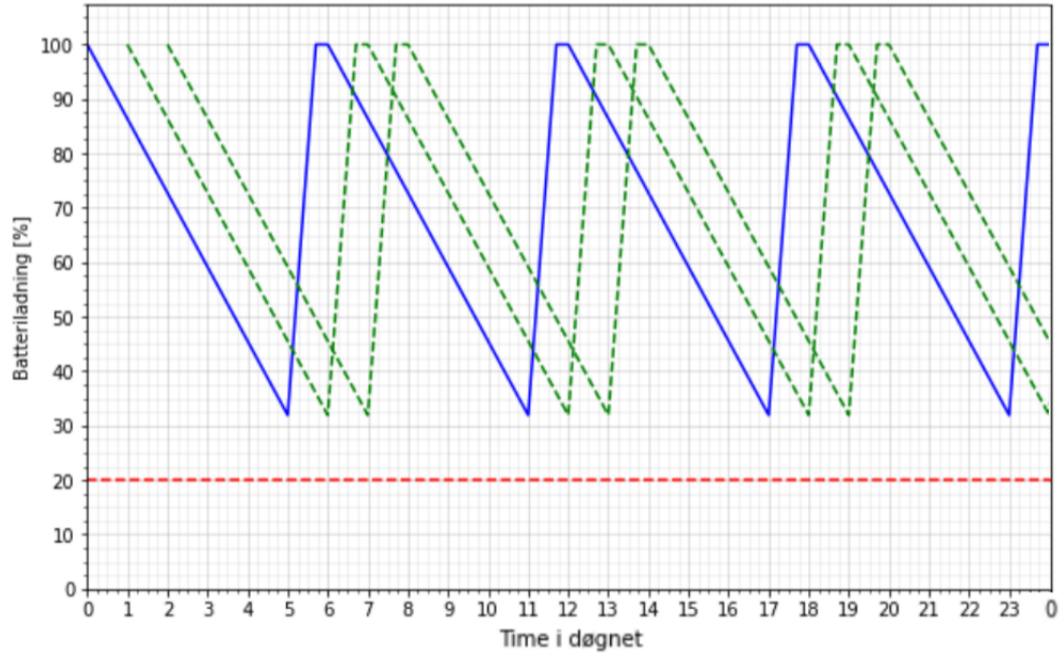
Figur 11: Forslag til ladesyklus for fire ELRS, pessimistisk tilfelle. 587 kWh batteri. 1,5 time lading, 6,5 timer kjøring.

Figur 12 viser hvordan korreksjonsfaktorene påvirker en ELEH, med samme parametre og

turnus som i figur 9. Det kan vises fra grafen at ladenivået ville kunne gå til ca. 5 % i løpet av en kjøreperiode. Selv om ladningsnivået aldri gikk til null, og maskinen så vidt ble fulladet i hver ladeperiode, var marginene svært små. Det ble derfor valgt å endre på løsningen. Av samme årsaker som forklart i delkapittel 4.2, ble det valgt å legge til en ekstra ladesyklus, fremfor å øke batteristørrelsen. Figur 13 viser et forslag til ladesyklus over et døgn for tre ELEH med 407 kWh batteripakke.



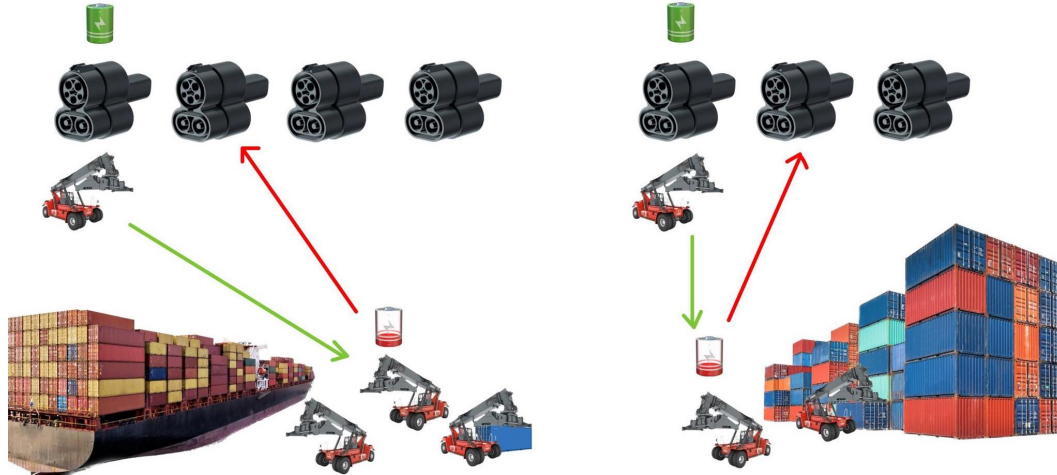
Figur 12: ELEH 407 kWh, korrigert for pessimistiske forhold. 1 time lading, 7 timer kjøring.



Figur 13: Forslag til ladesyklus for tre ELEH, pessimistisk tilfelle. 407 kWh batteri. 1 time lading, 5 timer kjøring.

4.4 Ladeinfrastruktur

Når det gjelder antall ladere for reachstackerene, er det nok med en lader per type reachstacker som kan bli avlest fra figur 11 og figur 13 når det er kun én reachstacker som lader av gangen. Det vil si at to ladere er minimumskrav om ladesyklusen følges, for de syv elektriske reachstackerene. Maksimumskrav er å ha en lader per elektrisk reachstacker. Med totalt syv ladere, har hver reachstacker sin egen lader og det blir ikke brukt ekstra tid på flytting og parkering, når de elektriske reachstackerene skal byttes om.



Figur 14: Ladesyklus i praksis [16, 28, 29, 30, 31]

Figur 4 ble laget ved å redigere sammen bilder fra forskjellige nettsider. Kildehenvisning til bildene står i beskrivelsen.

I figur 4 er det illustrert hvordan ladesyklusen fungerer i praksis, med ELRS på venstre side av figuren og ELEH på høyre side. Figuren viser at det er tre ELRS i drift og en ELRS som lader. Når en ELRS får lavt batterinivå, er det en ELRS som er fulladet og klar for å ta over og den ene ELRS som går tom blir satt til lading.

Det er også to ELEH i drift og en ELEH som lader i figuren. Den samme metoden for ELRS blir illustrert for ELEH. Når en ELEH som er i drift går tom for strøm, er det en fulladet ELEH som er klar for å ta over, samtidig som den ene ELEH som går tom blir satt på lading.

For at det alltid skal være tre ELRS i drift, er det nesten alltid en ELRS som er fulladet og klar for å skiftes med en ELRS som går tom for strøm som blir satt på lading.

Hvis alle elektriske reachstackerene skal ha sin egen designert lader, som er maksimalkrav, blir det enklere å holde styr på dem.

4.5 Svar på spørsmål fra andre havner

Dette er svarene på spørsmålene som ble stilt til havnene som hadde bestilt elektriske reachstackere i delkapittel 3.7

1. Hvor mange reachstackere har dere i drift på deres havn?

Fredrikstad: Vi har 4 reachstackere i drift idag (diesel).

Stavanger: 3

Bergen: 1

2. Hvor mange elektriske reachstackere har dere bestilt? Og hvor mange elektriske reachstackere er i drift idag?

Fredrikstad: Vi har bestilt to nye reachstackere med levering i år. En eco-fuel som skal redusere dieselforbruket med 20-30 % og en elektrisk med levering i fjerde kvartal. Disse skal erstatte våre to eldste slik at vi fortsatt vil ha fire.

Stavanger: Foreløpig kun 1 el-stacker i bestilling, ingen i drift da levering er forsinket (opp-rinnelig leveringsdato nov 2022, siste oppdaterte er levering i juni 2023)

Bergen: Ingen elektriske reachstackere bestilt.

3. Er planen å gå over til bare elektriske reachstackere? Isåfall: Hvor mange elektriske reachstackere kommer dere til å ha i drift i forhold til når det bare var fossilt drevne reachstackere?

Fredrikstad: Vi har ingen konkret plan for overgang til kun elektrisk, men vil bruke den første til å høste erfaringer. Økonomisk kan det ikke forsvares å ha flere reachstackere fordi de er elektriske så kapasiteten for en elektrisk må være mer eller mindre tilsvarende en dieselmodell, altså fortsatt fire.

Stavanger og Bergen: Dette beror på erfaringene vi får med elektrisk og hvilke andre alternativer som kommer på markedet de kommende årene. Vi har en uttalt ambisjon om å bli nullutslippsbedrift innen 2030 og jobber mot å erstatte alt som går på fossile brensel med nullutslippsløsninger. Dette kan være elektrisk, men også etter hvert brenselceller/hydrogen etc.

4. Om dere har noen elektriske reachstackere i drift idag: Hvilke utfordringer har dere møtt ved å innføre elektriske reachstackere? Har det gått ut over driften på deres havn? Har dere erfart noe spesielt negativt eller spesielt positivt ved innføringen av elektriske reachstackere?

Fredrikstad: Vi har ikke elektriske i drift i dag

Stavanger og Bergen: Vi har ikke elektriske reachstackere i drift i dag.

5. Om dere skal gå over til bare elektriske reachstackere: Må dere endre på arbeidstid/pauser for å tilrettelegge for lading av reachstackerene? Vil batterikapasiteten være en utfordring?

Fredrikstad: Våre reachstackere kan gå veldig mange timer i strekk og har ca 2.000 timer totalt per år. Så lenge vi bare skal ha en elektrisk er det ingen planer om endre arbeidstid eller pauser, men den må lades i minst en kort pause og lunsjpause for at den skal holde hele arbeidsdagen med en 350 kW lader. Basert på dagens batteri- og ladekapasitet ville vi fått litt utfordringer med å fullføre de lengste sammenhengende arbeidsøktene.

Stavanger og Bergen: Det er en rivende utvikling på batteriteknologi i dag, men den som er bestilt er bestilt med hurtiglade-batteriteknologi og vil trenge noen korte ladepauser i løpet av dagen for å kunne holde to fulle skift (lunsjpause 30 min + et par korte pauser ila dagen

– deretter fullading etter 2 skift). Vi ser ikke for oss at dette skaper store endringer i forhold til dagens situasjon.

5 Vurdering av miljøhensyn

Bakgrunnen for problemstillingen i denne rapporten er at Oslo Havn skal kutte ut 85 % av klimautslippene fra 2018 innen 2030. Dagens fossile reachstackere forbrenner store mengder diesel årlig. Forurensing som følge av dieseleksos medfører CO₂ utslipp, nitrogenoksider NO_x, karbonmonoksid CO, hydrokarboner, sot og svevestøv og andre farlige luftforurensinger og giftstoffer som blir diskutert i delkapittel 6.8 [32]. I dette kapitlet blir det sett nærmere på hvor mye CO₂-utslippet reduseres ved overgangen til elektrisk, og hvor stor utslippsreduksjonen blir for Oslo Havn og Oslo kommune.

5.1 Utslippsreduksjon ved kjøring

De estimerte CO₂-utslippene fra elektrisitet varierer mye for europeiske land. For å få en reduksjon i klimautslipp ved overgang til elektriske maskiner, er en forutsetning at produksjonen av den elektriske energien er fornybar. På grunn av dette er det en stor forskjell på utslippsreduksjon ved overgangen fra fossil til elektrisk for europeiske land. For noen land vil ikke overgangen medføre store reduksjoner av klimautslipp grunnet høyt utslipp ved produksjon av elektrisk energi [33]. Når det gjelder fornybar elektrisitet, er Norge et av landene som leder an, grunnet høy andel vannkraft. Dette vil si at å introdusere elektriske reachstackere i Norge kan gi stor miljømessig avkastning, grunnet ren elektrisitet.

Årlig CO₂-utslipp ved kjøring kan estimeres ved å sammenligne utslippene fra diesel og norsk elektrisk energi. Forbrenning av en liter diesel, medfører et CO₂-utslipp på 2,7 kg, i følge to kilder [34, 33]. Norsk elektrisk energi medfører et CO₂-utslipp på omtrent 0,03 kg per kWh [35]. Med kjøredata for de fossile reachstackerene i tabell 2, kunne årlig drivstofforbruk estimeres. Dette ble utført ved å summere forbrukene til alle fem reachstackerene i perioden på to måneder, og gange forbruket med seks. Det er ikke kjent om forbruket i denne perioden er representativt for resten av året, men antas å være et godt estimat. Deretter ble det årlige dieselforbruket ganget med utslipp per liter diesel. Resultatet var et årlig drivstofforbruk på omtrent 119500 liter, som medførte CO₂-utslipp på omtrent 322 tonn.

For å estimere CO₂-utslipp for elektriske reachstackere, antas det at de elektriske er i drift like mange timer i året, som de fossile. Effektorbruket for hhv. RS og EH ble beregnet til å være 53,2 kW og 44,3 kW i delkapittel 3.3. Disse verdiene bruker $k_1 = 1, 2$, altså et høyere forbruk grunnet batteritemperatursystemet. Dette stemmer nok ikke for sommerhalvdelen av året, men ble ansett som godt nok for å gjøre et estimat. Ved å multiplisere driftstid, effektforbruk og utslipp per kWh, ble det totale CO₂-utslippet for elektriske reachstackere omtrent 20 tonn i året, for 669 865 kWh. Sammenlignet med utslippet til fossile, vil det være en estimert reduksjon på omtrent 300 tonn CO₂ i året. Dette vil være en prosentvis reduksjon på omtrent 94 %.

5.2 Utslipp ved produksjon

De totale CO₂-utslippene fra produksjonen av en elektrisk reachstacker er komplisert å beregne, da den består av mange deler og materialer fra ulike produksjonskjeder. Det ble heller valgt å gjøre en sammenligning mellom elektriske og fossile. Som nevnt i delkapittel 2.3, er maskinene nesten like, med unntak av energikilden. Litium-ionbatterier er svært ressurskrevende å produsere, og anses i denne rapporten som hovedforskjellen i produksjonsutslipp. For å finne produksjonsutslipp for litium-ionbatterier, ble det brukt en rapport fra ICCT (The International Council on Clean Transportation), som tok for seg miljøutslipp fra produksjon av elbilbatterier [36]. I rapporten refereres det til 11 forskjellige studier om utslipp fra elbilbatteriproduksjon. Ti av studiene var fra perioden 2015 til 2017, en var fra 2011. Derfor kan de være noe utdaterte, grunnet den raske utviklingen i batteriteknologi. Resultatene var svært forskjellige, med resultater fra 30 kgCO₂eq/kWh til 494 kgCO₂eq/kWh. Fordi batteriproduksjon er en energiintensiv prosess, vil utslippene variere avhengig av miljøavtrykket til elektrisiteten i produksjonslandet. For å finne en verdi som kunne brukes til videre beregninger, ble gjennomsnittet av de 11 studiene utregnet. Resultatet ble et utslipp på 140 kgCO₂eq/kWh. Dette illustrerer viktigheten av å ikke velge større batteripakker enn nødvendig, da det kan medføre store miljøutslipp. I delkapittel 4.3 ble det foreslått en løsning der fire reachstackere hadde 587 kWh batteripakke, og tre hadde 407 kWh batteripakke. Denne løsningen ville dermed medført et utslipp på omtrent 500 tonn CO₂ for å produsere batteriene. I delkapittel 5.1 ble det beregnet en reduksjon i kjøreutslipp på omtrent 300 tonn CO₂. Denne reduksjonen ville dermed gjøre opp for utslippene fra produksjon innen to år.

5.3 Batteriets livsløp

Kalmar tar ansvar for hele livsløpet til batteriene, ved å gjenbruke og resirkulere etter batteriets levetid har gått ut og vil følge restverdien til maskinen. Batteriene som Kalmar bruker i sine reachstackere har et første liv på 10 til 12 år. Batteriet har igjen 80 % kapasitet etter disse årene. På grunn av så høy kapasitet etter 10 til 12 år, er det forventet at batteriet skal ha et andre og tredje liv. Batteriet kan brukes på nytt, gjenbrukes i annet utstyr og deretter vil det bli resirkulert. 95 % av selve batteriet kan bli resirkulert [26]. Materialene som blir resirkulert vil sannsynligvis bli deler i nye batterier som kan bli brukt for annet utstyr. Dette gjør den generelle bærekraften til batteriene svært høy [33].

5.4 Utslippsreduksjon

Oslo Havn har en null-utslippsplan som har et mål om 85 % reduksjon av CO₂ utslipp innen 2030. I 2018 hadde Oslo Havn beregnet sin totale utslipp til 56 730 tonn CO₂ innenfor «innseiling Oslo». Dette utgjorde 4,36 % av utslippene til Oslo kommune i 2018, som hadde et totalutslipp på 1,3 millioner tonn CO₂ [37]. Utslippsreduksjonen for kjøring beregnet i delkapittel 5.1 var på omtrent 300 tonn CO₂ årlig. Med utslippet fra produksjon av batterier fordelt over 10 års levetid, ble reduksjonen omtrent 250 tonn årlig. Dette ville tilsvare en prosentvis utslippsreduksjon for Oslo Havn på omtrent 0,44 %, og 0,02 % for hele Oslo

kommune. Dette vil være et lite bidrag til målet om 85 % reduksjon innen 2030. I tillegg vil det bidra til FNs bærekraftsmål 9.4, som sier at det innen 2030 skal oppgraderes til infrastruktur med mer miljøvennlige teknologier.

6 Diskusjon

I dette kapittelet vurderes det hvordan resultatene fra simulasjonene kan brukes som reelle løsninger. Videre blir det sett på hvordan usikkerheter i beregningene kan påvirke utfallet av resultatet. Det blir også diskutert flere aspekter av overgangen, som innføringen av ladeinfrastruktur, økonomiske påvirkninger og samfunnsmessige utfordringer.

6.1 Antall reachstackere og batteripakker

I delkapittel 4.1 ble det forsøkt å erstatte de fem fossile reachstackerene med fem elektriske reachstackere. Dette ble forsøkt ved å ta utgangspunkt i dagens skiftordning fra delkapittel 3.5 og den største tilgjengelige batteripakken. En-til-en erstatning ville ikke fungert ved overgang til elektrisk, ettersom ladesyklusen ikke kunne gjentas etter 24 timer. Dermed kunne ikke dagens fossile reachstackere erstattes med like mange elektriske reachstackere, hvis de skulle være i drift etter dagens skiftordning.

Videre ble det forsøkt med én ekstra elektrisk reachstacker per type fossil reachstacker (RS og EH). med utgangspunkt i at fem reachstackere skulle være i kontinuerlig drift. Fire elektriske reachstackere med 587 kWh batteripakke ville erstatte de tre fossile tungløfterene, og tre elektriske med 407 kWh batteripakke ville erstatte de to fossile lettløfterene. I et optimistisk tilfelle kunne disse ha samme arbeidskapasitet som dagens fem fossile, fordret at ladesyklusene presentert i figur 8 og 9 følges.

Med overgangen til elektrisk var det ikke nok med å se på den ideelle løsningen i delkapittel 4.2 og batteriets kapasitet i tillegg til utetemperatur måtte bli tatt i betrakning. I delkapittel 4.3 ble det forsøkt med samme antall reachstackere og samme batteripakker som i delkapittel 4.2, men med et 20 % redusert batterikapasitet, 20 % økt totalforbruk grunnet batteritemperatursystemet og 10 % redusert ladeeffekt. Med disse korreksjonsfaktorene måtte ladesyklusene endres, som vist i figur 11 og 13.

Fra figur 11 vises det at minimum tre ELRS kan være i kontinuerlig drift. Men det er også tre perioder på to timer der alle fire kan være i drift. Dette er mer enn dagens tre RS har kapasitet til. Altså vil den elektriske løsningen kunne ha større arbeidskapasitet enn dagens fossile. Bemanningen må selvsagt økes for å utnytte den maksimale kapasiteten. Det samme resonnetet er gyldig for ELEH, sammenlignet med EH.

6.2 Alternative løsninger

Løsningen som ble diskutert i delkapittel 6.1 tok for seg et *verste tilfelle*, der dagens fem reachstackere skulle være i drift 24 timer i døgnet. Dette kunne være aktuelt når ett eller flere store skip ankom containerterminalen og måtte losses hurtig. Med denne løsningen kunne syv elektriske reachstackere ha samme arbeidskapasitet som dagens fem fossile. I den daglige driften er driftsbehovet lavere. Fra kjøredata innhentet fra Yilport (beskrevet i delkapittel 3.2.2), vises det at reachstackerene er langt fra å være i kontinuerlig drift. Det nærmeste

tilfellet kontinuerlig drift vi ser fra kjøredata var 22.11.2022. Da var RS2 i drift i omtrent 21 timer, og RS3 i drift omtrent 22,5 timer. Likevel sto RS1 stille hele dagen, og var i drift 0 timer. Dette kan tyde på at scenariet det ble tatt utgangspunkt i ikke er representativt for daglig drift. Ved å gjøre beregninger på et scenario for vanlig daglig drift, kunne løsningen blitt annerledes. Det kunne eksempelvis blitt forsøkt en en-til-en erstatning, der det ble beholdt en eller to fossile, som kun hadde blitt tatt i bruk ved høyt driftsbehov.

6.3 Usikkerhet i beregninger

Resultatene i denne rapporten bygger på effektbehovet beregnet i delkapittel 3.2. Usikkerheter i denne beregningen ville føre til usikkerheter i grafene for ladesykluser. Usikkerheter i ladesyklusene ville føre til usikkerhet i valg av antall reachstackere, og batteristørrelser. Dessverre var det mye usikkerhet i variablene knyttet til denne beregningen. I tabell 5 ble påvirkningen fra usikkerhetene beregnet.

En annen kilde til usikkerhet er antagelsen gjort i delkapittel 3.1 om at elektriske og fossile reachstackere har likt forbruk (foruten batteritemperatursystemet). Eksempelvis bruker fossile reachstackere spillvarme fra dieselmotoren til oppvarming av førerhuset. For elektriske reachstackere, måtte denne effekten leveres fra batteriet. Denne effekten ville være størrelsesorden 1 kW, mens utregnet bevegelseeffekt er i størrelsesorden 50 kW. Det er sannsynligvis flere slike små usikkerheter som ikke er omtalt eller kjent i denne rapporten. Sammen med usikkerhetene beregnet i tabell 5, ville den totale usikkerheten bli stor.

Overgangen til elektriske reachstackere vil være en iterativ prosess. Det teoretiske grunnlaget denne rapporten legger frem, med effektberegninger og simuleringer, kan være det første steget i prosessen. Neste steg kan være å gjøre praktiske forsøk, i form av gradvis innføring av elektriske reachstackere. Dermed kan ny informasjon hentes inn, og det teoretiske grunnlaget kan forbedres. Usikkerhetsområdet kan innsnevres, og resultatene vil bli mer pålitelige. Med Python-programmet kan nye simuleringer utføres, og forslag til ladesykluser og batteripakker kan justeres.

6.4 Ladeinfrastruktur

Ved å innføre elektriske reachstackere på Oslo Havn vil det også innebære at en må installere ladestasjoner som har nok kapasitet til å gjøre ladingen så effektiv som mulig. Det er også viktig at ladestasjonene er plassert slik at det vil gå minst mulig ut over driften på Oslo Havn. Ideelt sett bør ladestasjonene være plassert inne på containerområdet, slik at det går minst mulig tid fra arbeidsområdet til ladestasjonene.

Elektriske reachstackere er i en innføringsfase, der den første elektriske reachstackeren på en norsk havn er forventet levert til Risavika i juni 2023, ifølge svar fra Westport i delkapittel 4.5. Derfor har det ikke blitt satt en «standard» for hvilke løsninger som fungerer best. Løsningen valgt i Risavika er en ladeløsning utarbeidet i samarbeid med Kalmar, så det vil være naturlig å tenke at en lignende løsning vil være aktuell i Oslo Havn. Det vil da bli installert CCS-lader,

som gir en ladekapasitet på maksimalt 350kW. Det er viktig at ladesystemet som installeres har såpass høy kapasitet, siden det fører til at ladetiden minimeres og produktiviteten kan maksimeres.

Som resultatet fra delkapittel 4.4 viser kan det ved en ideell situasjon holde med bare to ladere. Da vil alle de andre reachstackerene operere mens kun én ELRS og én ELEH vil stå til lading. Ved en slik løsning vil det være nødvendig å opprettholde ladestrukturen nøyaktig etter planen. For hvis én reachstacker bruker for mye av sin batterikapasitet i forhold til oppsatt plan så vil det føre til en kjedereaksjon som igjen kunne føre til at det går ut over driften på Oslo Havn på grunn av at flere reachstackere må lade samtidig. En annen løsning er å ha en lader til hver reachstacker, da vil det alltid være mulighet for nødvendig lading. Dette vil føre til høyere driftssikkerhet og også flere muligheter for å justere på ladestruktur. Denne løsningen anses derfor som et bedre alternativ, selv om kostnaden for ladinfrastrukturen ville bli høyere.

6.5 Økonomisk hensyn

Ved en overgang fra dieseldrevne reachstackere til elektriske reachstackere er det økonomiske aspektet en veldig viktig del av diskusjonen. Prisene per stykk på de to største batteristørrelsene Kalmar kan levere ligger på 11 040 000 NOK eks.mva. for 407 kWh og 11 880 000 NOK eks.mva. for 587 kWh, som vist i delkapittel 3.6. Dette vil si at det er en forskjell på 840 000 NOK per stykk for de to forskjellige batteripakkene. Skal man gå for en løsning lik den foreslått i resultatdelen så må man anskaffe syv stykk elektriske reachstackere, fire stykk med batteripakke på 587 kWh og tre stykk med batteripakke på 407 kWh. Fra et økonomisk perspektiv vil det være vesentlig forskjell på å velge elektriske reachstackere utstyrt med en batteripakke på 407 kWh kontra en batteripakke på 587 kWh. Det vil bli en prisforskjell på 2 520 000 NOK hvis EH erstattes med batteripakker på 407 kWh istedenfor å velge batteripakkene på 587 kWh.

Som det vises i resultatdelen så er driftsbehovet på Oslo Havn såpass høyt at RS må erstattes med batteripakker på 587 kWh, mens EH kan erstattes med batteripakker på 407 kWh. Siden første prioritet er å opprettholde dagens standard når det kommer til leveringsikkerhet og effektivitet, så vil det nok være hensiktsmessig å gå for en slik løsning. Det kan selvfølgelig velges en løsning der både EH og RS erstattes med reachstackere utstyrt med 587 kWh batteripakker, noe som vil føre til enda mer fleksibilitet når det kommer til ladesyklus og brukstid. Men dette vil ikke være økonomisk gunstig, og vil ramme Yilport/Oslo Havn mer økonomisk enn det gagnar.

Etter at førstegangsinvesteringen er gjort vil utgiftene bli like uansett hvilke batteripakker man går for. Hovedutgiften etter innkjøp er ved drift, som blir kostnaden ved lading av reachstackerene istedenfor fylling av diesel. Kostnad for strøm ved lading vil være den samme uansett om man går for batteripakken på 407 kWh eller 587 kWh, siden størrelsen på batteriet bare går ut over kapasiteten og ikke forbruket.

Med tanke på at elektriske reachstackere er et relativt nytt produkt på markedet er det enda

ikke etablert i bransjen. I takt med at nyutviklingen blir mer utbredt, vil flere produsenter starte å produsere elektriske reachstackere. Dermed vil det bli konkurranse om kundene, noe som vil føre til at prisene justerer seg.

6.6 Netto nåverdiberegning

For å forsøke å få et inntrykk av de økonomiske konsekvensene ved overgang til elektrisk, vil det bli utført en beregning basert på netto nåverdi (NNV). Dette er et verktøy for å bestemme om en investering er bedriftsøkonomisk lønnsom over tid, basert på investeringskostnad, driftskostnad og bedriftens krav om avkastning på investeringen. Ved en antagelse om at dagens fem fossile reachstackere på et tidspunkt skal erstattes med *enten* fem like fossile eller syv elektriske, kan det undersøkes om besparelser i driftskostnader vil dekke investeringskostnaden. Beregningen antar en levetid på 10 år for fossile og elektriske, før de erstattes.

6.6.1 Investeringskostnad

Investeringskostnaden k_0 er prisforskjellen mellom de to alternativene. Prisene for elektriske reachstackere er hentet fra delkapittel 3.6. Totalprisen for syv maskiner (fire 587 kWh og tre 407 kWh), ble 100 800 000 NOK, inkludert mva. Dette inkluderer ikke ladere, som ville bli en ekstra kostnad. Denne neglisjeres, og det vil fremkomme senere i beregningen at dette har lite påvirkning på utfallet. Omtrentlige priser for fossile reachstackere ble tilsent på e-post av Region Sales Manager i Kalmar 09.05.2023. Prisen ekskludert mva. var 6 900 000 NOK for en fossil maskin med 45 tonn løftekapasitet, og 3 800 000 NOK for en maskin med 10 tonn løftekapasitet. Med tre av førstnevnte og to av sistnevnte (tilsvarende dagens løsning), ble totalprisen 35 375 000 NOK inkludert mva. Det finnes støtteordninger for kjøp av elektriske kjøretøy. Ved hjelp av en støtteordning som tok slutt i mai 2023, kunne 40 % av merkostnaden for en elektrisk reachstacker dekkes. Denne ville bli erstattet av en ny støtteordning, med litt forskjellige parametere. Dette kom frem i et møte 10.05.2023 med en prosjektleder i Oslo Havn. For diskusjonens skyld, antas det i denne delen at 40 % av merkostnaden for syv elektriske reachstackere (sammenlignet med den dyreste fossile), dekkes av utenforstående. Dermed ble totalprisen redusert til 91 830 000 NOK. Investeringskostnaden k_0 ble 56 455 000 NOK.

6.6.2 Driftskostnad

Etter investeringen var det prisen for diesel p_d , og elektrisk energi p_{el} som var hovedforskjellen. Dieselprisen for de fossile maskinene ble tilsendt på e-post fra Equipment & Maintenance Manager i Yilport 10.05.2023. Prisen på siste faktura var 12,04 NOK per liter, men det varierer. 12 NOK per liter brukes i videre beregninger. I delkapittel 5.1 ble det årlige dieselforbruket f_d beregnet til 119 500 liter, og det elektriske energiforbruket f_{el} ble 699 865 kWh.

6.6.3 Avkastning på investering

Ønsket avkastning blir satt til null i videre beregninger. Det eneste kravet som settes er at avkastningen følger inflasjonen r . Dermed blir beregningen en nøytral betraktning på utfallet av overgang til elektrisk. Regnestykket for NNV blir:

$$NNV = -k_0 + \sum_{n=1}^{10} \frac{(p_d \cdot f_d - p_{el} \cdot f_{el}) \cdot (1+r)^n}{(1+r)^n} \quad (6)$$

Det vises fra likning (6) at inflasjon over tid $(1+r)^n$ kan forkortes bort fra likningen, fordi prisene for elektrisk energi og diesel også påvirkes av inflasjon, i likhet med avkastningskravet. Variabelen i likning (6) som medfører størst usikkerhet er p_{el} , strømprisen. Det er ikke mulig å avgjøre hva denne vil være de neste 10 årene. Dieselpriene vil også variere, men antageligvis ikke like mye. Derfor ble det valgt å ikke beregne NNV, men heller gjøre et estimat for hvor lav strømprisen må være for at investeringen vil tilbakebetales uten avkastning etter 10 år. Likning (6) kan dermed omskrives og forenkles slik:

$$p_{el} = \frac{-k_0 + 10p_d \cdot f_d}{10f_{el}} \quad (7)$$

Med innsatte verdier i likning (7), blir nødvendig strømpris for å dekke investeringskostnaden -6,02 NOK per kWh. Altså ville det ikke være lønnsomt, selv med gratis elektrisk energi. Med et optimistisk estimat på 1 NOK per kWh, ville besparelsen i driftskostnader bli omtrent 734 000 NOK årlig. Dette var ikke nok til dekke investeringskostnaden, og NNV ville bli -49 113 650 NOK for investeringen over 10 år.

Flere usikkerheter er tilstede i beregningen. Kostnaden for lading ble utelatt, størrelsen på eventuelle subsidier er ikke kjent, og prisene for reachstackere avhenger av kundeforholdet mellom Kalmar og innkjøper. Likevel tyder beregningen på at det vil være svært bedriftsøkonomisk ulønnsomt å velge løsningen med syv elektriske, fremfor fem fossile.

6.7 Vurdering av informasjon fra andre havner

Basert på svarene som ble innhentet fra Westport og Andersen & Mørck er det mulig å danne seg et tydelig bilde på hvordan situasjonen er rundt elektriske reachstackere idag. Det er fortsatt usikkerhet i markedet rundt hva som vil være den beste løsningen for fremtiden, og hvordan man skal løse overgangen til utstyr som drives av fornybar energi. Både Stavanger havn og Fredrikstad havn går for å teste ut en enkelt elektrisk reachstacker først, og deretter vurdere videre hva som vil være den beste løsningen. En slik løsning er et trygt alternativ, som vil gi gode indikasjoner på hvordan en total utskiftning av de fossilt drevne reachstackerene kan gjøres på en tryggest mulig måte. Slik situasjonen er nå, så er det ingen reelle erfaringer å basere seg på, så det vil på mange måter være den beste løsningen å anskaffe seg erfaringer selv. Dette er sannsynligvis en god løsning for havnene i Stavanger og Fredrikstad.

Men for Oslo Havn blir det vanskelig å kunne gjøre det på denne måten, siden kravene om overgangen til en utslippsfri havn er mye strengere, og må bli gjennomført på et mye kortere tidsperspektiv enn i Stavanger og Fredrikstad.

Gjennom svarene kommer det frem at Fredrikstad Havn skal benytte seg av lader på 350 kW, som Stavanger Havn også har uttalt seg om at de skal benytte. Dette underbygger også at det bør bli valgt en ladeløsning som gir muligheten for ladekapasitet på opp til 350 kW på Oslo Havn. Ut ifra kontakten med Fredrikstad Havn, Stavanger Havn og Bergen Havn kan det se ut til at de er i samme situasjon som Oslo Havn. Det er få reelle erfaringer å basere løsningene på, som igjen gjør at erfaringene som blir gjort de neste årene i bransjen er svært viktige for veien videre. Dette i tillegg til at teknologien er i konstant utvikling, fører til at det stadig ventes på en konkret løsning som vil være den beste.

6.8 Samfunnsperspektiv

Når det gjelder forurensinger ved forbrenning av diesel, er det som oftest fokus på CO₂ gassen, men det er mange andre forurensinger ved denne prosessen. Når drivstoff brennes i en motor blir svovel produsert. Hvor mye svovel som blir produsert er knyttet til hvor mye forurensing oppstår ved forbrenning av diesel. Høye nivåer av svovel øker forurensingene. Utslippene som resulterer ved dieselforbrenning i motorer bidrar til luftforurensinger som har alvorlige helse- og miljøeffekter for mennesker. Forurensing ved diesel eksos omfatter oksider av nitrogen NO_x, hydrokarboner, karbonmonoksid CO, sot og svevestøv og andre farlige luftforurensinger og giftstoffer [32]. Hvis det blir tatt utgangspunkt i menneskelig helse, kan eksponering for diesel eksos føre til alvorlige helsetilstander som astma og luftveisykdommer og kan forverre eksisterende hjerte og lungesykdommer, spesielt hos barn og eldre. Utslipp ved dieselmotorer inneholder oksider av nitrogen NO_x som bidrar til produksjon av ozon ved bakkenivå som skader avlinger, trær og annen vegetasjon. Ved disse utslippene, kan det også produseres sur nedbør, som påvirker jord, innsjøer og bekker. Sur nedbør kommer inn i menneskets næringskjede via vann, råvarer, kjøtt og fisk. NO_x utslippene bidrar også til redusert sikt og skade på eiendom. Klimaendringer generelt påvirker luft og vannkvalitet, værmønster, havnivåer, økosystemer og landbruk [38]. Ved elektrifisering er det ingen dieselforbrenning som kan slippe ut disse forurensingene. Dette er også et steg fram mot å nå FN's bærekraftsdelmål nummer 11.6, som innebærer å redusere negative påvirkninger på miljø innen 2030, med fokus på luftkvalitet [5].

Hvis det skulle oppstå en nødsituasjon eller en hendelse hvor strømtilførselen skulle forsvinne, ville Oslo Havn ikke hatt mulighet til å lade de elektriske kjøretøyene. Uten mulighet til å drifte havna vil det fort kunne ramme leveransene av livsviktige varer som mat og medisin. I et slikt tilfelle hadde en nødløsning vært nødvendig for å holde Oslo Havn i gang. Det å installere et diesellaggregat (nøddaggregat) som kan gi strøm til laderne kan være en løsning. Slik kan Oslo Havn holde seg i drift så lenge det er tilgang til diesel. I en nødsituasjon er det sannsynligvis ikke samme behov/etterspørsel på grunn av skip ut og inn i landet, og et diesellaggregat kunne vært en løsning for å ha muligheten til å operere én til to reachstackere for samfunnskritiske varer som leveranser av mat og medisin. En annen nødløsning er å beholde

et mindre antall dieseldrevne reachstackere, som kan opprettholde driften uten tilgangen på elektrisk strøm fra kraftnettet. Denne løsningen sammenfaller godt med delkapittel 6.2, der det ble foreslått å beholde en til to fossile reachstackere til perioder med høyt driftsbehov.

6.9 Overgangen til elektrisk

Undersøkelsene gjort for elektrifisering av de fem reachstackerene som er i drift i dag ble gjort med utgangspunkt i at alle fem fossile reachstackere skulle erstattes med elektriske. Hvordan overgangen fra fossil til elektrisk vil foregå er høyst usikkert. Det må være muligheter for å vurdere flere fremgangsmåter for å gjennomføre overgangen.

Kalmar sine elektriske reachstackere er nye i markedet. Dette kan føre til en del usikkerheter når havner skal gjennomgå overgangen til elektriske. Flere havner ble kontaktet i delkapittel 3.7 og svarene som ble innhentet i delkapittel 4.5 har vært til hjelp for å se dagnes status på denne overgangen. Svarene hjalp med å se på hva andre havner hadde gjort med tanke på overgangen til elektrisk og med å få innsikt i hvilken tilnærminger Oslo Havn burde ta.

Ingen av havnene som ble kontaktet hadde fått reachstackerene som ble bestilt, derfor var det ingen av dem som fikk hentet inn erfaringer med disse reachstackerene. Denne informasjonen hjalp med å vite at en drastisk overgang til elektrisk sannsynligvis ikke er den beste løsningen for Oslo Havn, hvis leveringssikkerhet tas i betraktning.

Ideelt sett, miljømessig, vil være å skifte ut alle reachstackerene samtidig, og gjennomføre den grønne overgangen så fort som mulig. Teoretisk sett er dette en klok løsning, og vil redusere utslippene umiddelbart. Praktisk sett vil det sannsynligvis oppstå problemer ved denne løsningen. Kalmar sine elektriske reachstackere er relativt nye på markedet, og har enda ikke blitt fast inventar på havner rundt om kring i verden. Ved innføringen av slike nye produkter kan det oppstå uforutsette problemer som fort kan gå ut over leveringssikkerheten og produktiviteten. Dette i tillegg til at de elektriske reachstackerene som er bestilt til Stavanger og Fredrikstad allerede har lang leveringstid, vil gjøre en slik overgang lite sannsynlig.

For å øke leveringssikkerheten og tilgangen på gode avtaler fra Kalmar kan det være en mulighet for havnene å slå seg sammen om avtaler. Ved at flere havner slår seg sammen vil det være lettere å utarbeide en mer oversiktlig fremdriftsplan over leveranse av elektriske reachstackere og gode løsninger for eventuelle reparasjoner og problemer som skulle oppstå gjennom overgangen og i fremtiden. Slik situasjonen er nå er det lang ventetid på leveransene av elektriske reachstackere, noe som fort kan føre til at tilgangen på reservedeler også er redusert. Hvis en elektrisk reachstacker blir satt ut av drift over en lengre periode vil det også være med å redusere produktiviteten i havna. Ved en slik anledningen hadde en reserve vært nødvendig.

En alternativ løsning er å ha en gradvis overgang til elektrisk. Ved å gradvis innføre elektriske reachstackere, vil Oslo Havn få hentet inn erfaringer selv, og ha en sikkerhet om at effektivitet opprettholdes. En gradvis overgang kan begynne med å ha bare en elektrisk reachstacker som forsøker å erstatte en fossildreven reachstacker, uavhengig om det er en RS eller EH. Da

kan det undersøkes om ytelsen stemmer med de teoretiske beregningene i denne rapporten, eller om det må justeres. Med erfaringer fra denne, kan flere elektriske innføres, frem til driftsbehovet er dekket av elektriske.

En annen ting som er viktig å se på de kommende årene er hvilken andre alternativer som kommer på markedet. Enten om det er et oppgradert elektrisk alternativ eller et hydrogen alternativ. Ved en gradvis overgang til elektrisk/nullutslippsalternativer er det viktig å tenke på hva som kan komme på markedet i fremtiden. En drastisk overgang til en helelektrisk løsning fjerner muligheten for utvikling i takt med markedet, om markedet skulle gå mer mot en annen nullutslippsløsning.

7 Konklusjon

Gjennom resultatene av teoretiske beregninger og simuleringer, kom det frem at syv elektriske reachstackere var nødvendig for å erstatte dagens fem fossile. En overgang der maskinene erstattes en-til-en, ville ikke ha samme arbeidskapasitet som dagens fossile, grunnet stasjonær ladetid. En løsning som viste seg å kunne fungere var å investere i fire reachstackere med batteripakke på 587 kWh og tre med 407 kWh. Med et bestemt ladeoppsett, ville fem av syv elektriske reachstackere i teorien kunne være i drift kontinuerlig. Dermed var arbeidskapasiteten ivaretatt.

På grunn av usikkerheter i beregninger og mangelen på reelle erfaringer knyttet til elektriske reachstackere er det vanskelig å konkludere med hvilken løsning som er den beste. Med tanke på konsekvensene for både Oslo Havn og samfunnet generelt, er det viktig at Oslo Havn er i kontinuerlig drift. Derfor vil en gradvis overgang til elektriske reachstackere føre til at leveringssikkerheten opprettholdes, men samtidig utvikler Oslo Havn mot å bli utslippsfri på sikt. Ved å innføre en til to elektriske reachstackere i begynnelsen, kan ytelsen kartlegges, og sammenlignes med teoretiske beregninger i denne rapporten. Med et forbedret teorigrunnlag og praktiske erfaringer, kan en fullstendig overgang gjennomføres på en tryggere måte, sammenlignet med en rask overgang kun basert på teoretiske beregninger.

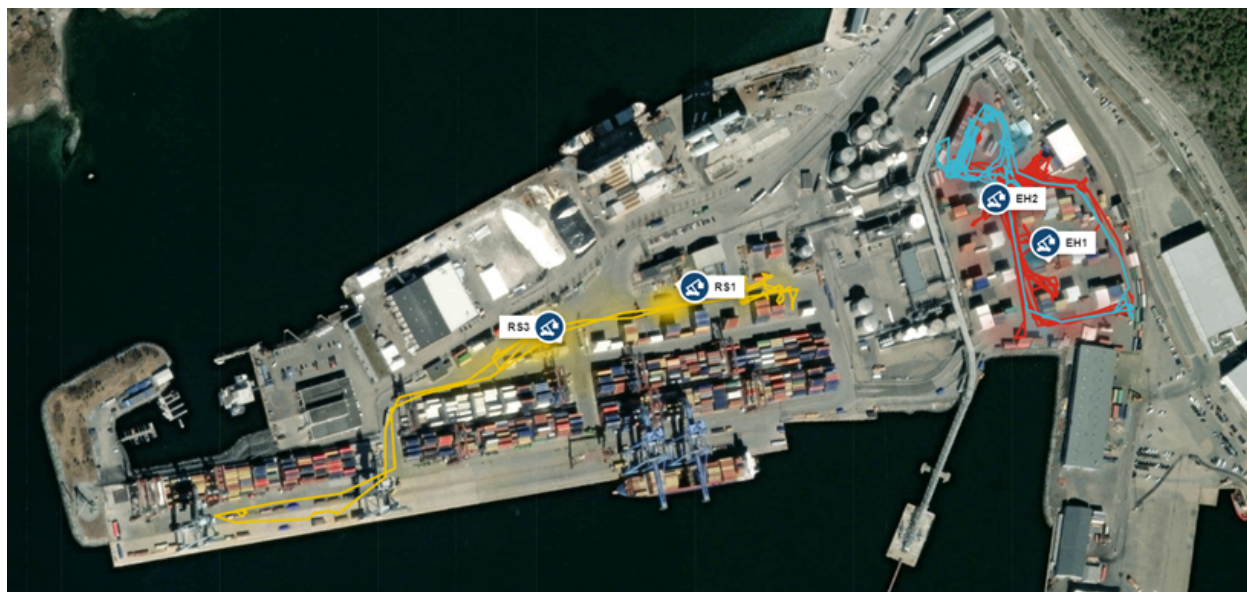
Teknologien er i stadig utvikling, og det er usikkert hvordan situasjonen vil se ut i fremtiden. Den tekniske løsningen som presenteres i denne rapporten kan fort være utdatert, avhengig av utviklingen til batteriteknologi, prisendringer og andre fornybare løsninger. Denne rapporten demonstrerte at overgangen til elektrisk vil være teknisk mulig. Fordi det er usikkerhet i beregningene, teknologien er i utvikling, og leveringssikkerheten til Oslo Havn må ivaretas, anbefales det at overgangen gjøres gradvis. En fremtidig løsning bør ha mulighet til å utvikle seg i takt med markedet. En fornybar erstatning av fossile reachstackere vil redusere klimagassutslipp, og være et steg i riktig retning mot Oslo Havns mål om å bli utslippsfri.

8 Videre arbeid

Med tanke på fremtidens utvikling blir det her sett på løsninger som kan være med å utvikle havna videre. Her vurderes muligheter som kan bidra til å optimalisere lademulighetene og øke produktiviteten, ved hjelp av konduktiv lading. Muligheten for å videreutvikle simuleringsprogrammet blir også drøftet.

8.1 Videreutvikling med ladeskinne

Den teknologiske utviklingen er stadig i endring. For å videreutvikle systemet på Oslo Havn er det viktig å planlegge for å kunne forbedre anlegget, slik at det forblir så miljøvennlig som mulig og så produktivt som mulig. En løsning som er svært aktuell er å installere konduktive ladeskinner i bakken, som vil gjøre det enkelt å lade når det er stopp i arbeidet i korte perioder. Løsningen som diskuteres her tar utgangspunkt i hvor langt dagens utvikling er kommet.



Figur 15: Oversikt over kjøreområde for reachstackere fra Yilport. Mottatt på e-post 10.02.2023 fra Manager i Yilport

Figur 15 viser oversikt over kjøreområdene for RS og EH reachstackere på Sjursøya containerterminal. Dette oversiktsbildet gir informasjon om hvor potensielle ladeskinner kunne blitt plassert. På grunn av at RS og EH reachstackerene har et forutsigbart kjøremønster er det en stor mulighet for å kunne installere ladeskinner i disse områdene.

Elonroad er en av de fremste utviklerne av lademuligheter. Et av flaggskip-prosjektene deres er utvikling av elektrisk vei, der kjøretøy har muligheten til å lade ved hjelp av en ladeskinne

montert i vegbanen. Ifølge Elonroad kan en slik skinne levere lading mellom 150-300 kW [39]. En usikker faktor ved denne løsningen er at produktet ikke er tatt i bruk på en stor skala enda. Løsningen er hovedsakelig prøvd ut i testprosjekter og kan derfor være risikabelt å benytte seg av. Utviklingen kan føre til at løsningen fort er utdatert eller at bransjen går en annen vei, som kan føre til at produktet ikke blir svært utbredt og dermed dyrt og lite kompatibelt med annen utvikling. Dette vil ikke være et problem om den konduktive ladeskinnen blir et populært produkt som kunder investerer i. Ved å installere en slik skinne på Oslo Havn kan det bidra til at ladesykluser på reachstackerene kan forbedres betraktelig. Ved å lade i små intervaller gjennom dagen på faste plasser eller på en fast strekning på Oslo Havn så vil det kunne øke leveringssikkerheten. Med en slik løsning vil det kunnes lade uten å måtte gå ut og fysisk koble til en lader, men det vil kunne gjøres fra førersetet. Dette er svært tidssparende og fører til at det er lettere å lade ved små pauser og ved venting. Det vil selvfølgelig kreve en investering i både installering av anlegg og innkjøp/modifisering av nye reachstackere. På samme måte som innkjøpet av de elektriske reachstackerene vil det være en høy investeringskostnad, mens driftskostnadene vil være lavere.

8.2 Simuleringsprogram

Da rapporten ble skrevet var elektrifisering av fossile kjøretøy et svært aktuelt tema. Et verktøy som kunne bestemme energibehovet til elektriske kjøretøy, og fremstille deres ladesykluser, kunne ha bruksområder mange steder. Selv om simuleringsprogrammet ble utviklet for å simulere reachstackere på Sjursøya, var det ingenting som stoppet det fra å brukes på andre kjøretøy, andre steder. Dersom man hadde informasjon om energiforbruket til fossile kjøretøy, kunne man simulere hvordan en elektrisk erstatning ville sett ut. Nødvendig batterikapasitet kunne itereres for en bestemt turnus. Nødvendig turnus kunne itereres for en bestemt batterikapasitet. Nyttent lå i å visualisere ulike løsninger, der situasjonen hadde mange variabler. For at programmet kunne tas i bruk av andre, måtte det ha blitt forbedret. Mye av koden var gjentakende og unødig innviklet. Slik programmet fungerte, var alle koordinatene definert som variabler i en liste, og ble endret avhengig av bruker-input. På denne måten var det begrenset hvor mange ladesykluser som kunne plottes i løpet av en periode, og programmet hadde kode som fjernet de ubrukte koordinatene. Et nytt program burde utvikles der kun nødvendige koordinater hadde blitt lagt i en liste. På den måten kunne brukervennligheten og påliteligheten blitt forbedret.

Referanser

- [1] Oslo Havn KF. *Om Oslo Havn*. URL: <https://www.oslohavn.no/no/meny/om-oslo-havn/om-oslo-havn-kf/>. (accessed: 20.04.2023).
- [2] Oslo Havn KF. *Oslo Havn kart*. URL: <https://www.oslohavn.no/globalassets/oslo-havn/dokumenter/kart-og-illustrasjoner/oslo-havn-kart.pdf>. (accessed: 20.04.2023).
- [3] Oslo Havn KF. *Sydhavna*. URL: <https://www.oslohavn.no/no/meny/fjordbyen/sydhavna/>. (accessed: 20.04.2023).
- [4] Oslo Havn KF. *Yilport Oslo offisielt åpnet*. URL: <https://www.oslohavn.no/no/arkiv/arkiv-2016/yilport-oslo-offisielt-apnet/>. (accessed: 20.04.2023).
- [5] FN. *FNs bærekraftsmål*. URL: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal>. (accessed: 03.02.2023).
- [6] Oslo Havn. *Oslo som nullutslippshavn*. URL: <https://www.oslohavn.no/no/meny/klima-og-miljo-i-oslo-by-og-havn/nullutslippshavn/>. (accessed: 03.02.2023).
- [7] Richard Martin Humphreys **and** others. “The Container Port Performance Index 2021: A Comparable Assessment of Container Port Performance”. **in**(2022).
- [8] Forkliftcenter. *KALMAR DRG450-65S5*. URL: <https://www.forkliftcenter.com/forklifts/7434/kalmar-drg450-65s5.html>. (accessed: 20.04.2023).
- [9] tungt.no. *Kalmar skal levere Sveriges første elektriske reachstacker*. URL: https://www.tungt.no/article/view/859780/kalmar_skal_levere_sveriges_forste_elektriske_reachstacker. (accessed: 14.04.2023).
- [10] UPS Battery Center. *600kWh Battery for World’s Largest Truck*. URL: <https://www.upsbatterycenter.com/blog/600kwh-battery-worlds-largest-truck/>. (accessed: 21.03.2023).
- [11] Dye, James L. Encyclopedia Britannica. *lithium*. <https://www.britannica.com/science/lithium-chemical-element>. Accessed: 9 February 2023. 2022.
- [12] Teknisk Ukeblad. *Hvordan fungerer litiumholdige batterier?* URL: <https://www.tu.no/artikler/hvordan-fungerer-litiumholdige-batterier-br/454352>. (accessed: 09.02.2023).
- [13] Battery University. *BU-808: How to Prolong Lithium-based Batteries*. URL: <https://batteryuniversity.com/article/bu-808-how-to-prolong-lithium-based-batteries>. (accessed: 16.05.2023).
- [14] naf. *Dette skjer når du kjører elbilen tom for strøm*. URL: <https://nye.naf.no/elbil/lading/kjore-elbilen-tom-for-strom>. (accessed: 21.04.2023).
- [15] Ladestasjoner. *Standard for hurtiglading*. URL: <https://www.ladestasjoner.no/hurtiglading/Standard-for-hurtiglading/>. (accessed: 11.04.2023).
- [16] stoke voltaics. *CCS Combo 1 Adapter*. URL: <https://www.stokevoltaics.com/products/tesla-smart-charging-adapter>. (accessed: 14.04.2023).
- [17] Wikipedia. *Combined Charging System*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Combined_Charging_System#cite_note-1. (accessed: 11.04.2023).
- [18] Norges Automobil-Forbund. *Lader til elbil – en enkel oversikt*. URL: <https://nye.naf.no/elbil/lading/ladestandarder-for-elbil>. (accessed: 11.04.2023).

- [19] Wikipedia. *Conductive charging*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Conductive_charging. (accessed: 21.04.2023).
- [20] Karl Alfred Wikse. *Bilmotor*. URL: <https://snl.no/bilmotor>. (accessed: 23.02.2023).
- [21] New South Wales Department of Primary Industries. *Comparing running costs of diesel, LPG and electrical pumpsets*. URL: https://www.dpi.nsw.gov.au/__data/assets/pdf_file/0011/665660/comparing-running-costs-of-diesel-lpg-and-electrical-pumpsets.pdf. (accessed: 14.04.2023).
- [22] Petro Systems. *How Does Temperature Affect My Stock ?* URL: <http://petrosystems.ie/services/temperature-compensation/>. (accessed: 14.04.2023).
- [23] Norges Automobil Forbund. *Elbiler i vintertest: Ingen klare rekkevidden oppgitt i reklamen*. URL: <https://nye.naf.no/elbil/bruke-elbil/test-rekkevidde-vinter-2022>. (accessed: 24.04.2023).
- [24] Yilport. *Production Time*. Mottatt som en MS Excel-fil på e-post fra Yilport 09.02.2023. Konvertert til LaTeX-tabell. Accessed: 09.02.2023. 2023.
- [25] Kalmar. *Brosjyre: The Kalmar Electric Reachstacker*. Mottatt på e-post fra Christian Raabe i Kalmar. Mottatt 02.02.2023. 2023.
- [26] Kalmar. *Brosjyre: Kalmar's Electric Reachstacker*. Mottatt på e-post fra Christian Raabe i Kalmar. Mottatt 02.02.2023. 2023.
- [27] Solar Impulse Foundation. *Elonroad*. URL: <https://solarimpulse.com/solutions-explorer/elonroad>. (accessed: 19.04.2023).
- [28] USA today news. *Fact check: Image of live shipping map shows those underway as well as those waiting to dock*. URL: <https://eu.usatoday.com/story/news/factcheck/2021/10/14/fact-check-photo-shows-all-ships-not-just-waiting-dock/8439046002/>. (accessed: 14.04.2023).
- [29] BNS Container AS. *20' ISO container*. URL: <https://www.bns-container.no/container/iso-lager-shipping/20-iso-container/>. (accessed: 14.04.2023).
- [30] Container One. *How Shipping Containers Are Made: Step by Step Process*. URL: <https://containerone.net/blogs/news/how-shipping-containers-are-made-step-by-step-process>. (accessed: 14.04.2023).
- [31] Kalmar. *Kalmar Electric Reachstacker*. URL: <https://www.kalmarglobal.com/equipment-services/reachstackers/electric-reachstacker/>. (accessed: 14.04.2023).
- [32] Environmental Protection Agency. *About Diesel Fuels*. URL: <https://www.epa.gov/diesel-fuel-standards/about-diesel-fuels>. (accessed: 08.05.2023).
- [33] Kalmar. *Kalmar's Electric Reachstacker: Shifting to electric? Your questions answered*. URL: <https://www.kalmarglobal.com/news--insights/webinars/electric-reachstacker-your-questions-answered2/>. (accessed: 27.04.2023).
- [34] Natural Resources Canada. *Learn the facts: Emissions from your vehicle*. URL: https://natural-resources.canada.ca/sites/nrcan/files/oe/pdf/transportation/fuel-efficient-technologies/autosmart_factsheet_9_e.pdf. (accessed: 16.05.2023).
- [35] Nowtricity. *CURRENT EMISSIONS IN NORWAY*. URL: <https://www.nowtricity.com/country/norway/#:~:text=Quick%20stats%20about%20Norway,countries%20in%20renewable%20energy%20production>. (accessed: 21.03.2023).

- [36] The International Council on Clean Transportation. *Effects of battery manufacturing on electric vehicle life-cycle greenhouse gas emissions*. URL: https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/EV-life-cycle-GHG_ICCT-Briefing_09022018_vF.pdf. (accessed: 08.05.2023).
- [37] Oslo Havn. *Sydhavna nullutslippshavn konseptutredning energisystem*. URL: <https://www.oslohavn.no/globalassets/oslo-havn/dokumenter/oslo-havn-publikasjoner-2021/sydhavna-nullutslippshavn--konseptutredning-energisystem.pdf>. (accessed: 16.05.2023).
- [38] EPA. *Learn About Impacts of Diesel Exhaust and the Diesel Emissions Reduction Act (DERA)*. URL: <https://www.epa.gov/dera/learn-about-impacts-diesel-exhaust-and-diesel-emissions-reduction-act-dera>. (accessed: 08.05.2023).
- [39] Elonroad. *The technology*. URL: https://elonroad.com/wp-content/uploads/2021/11/Onepager_spread_new2.pdf. (accessed: 11.04.2023).

Vedlegg

A Python-kode


```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

#RS/EH bevegelsesenergi

virkningsgrad_dieselmotor = 0.35
energi_per_liter_diesel = 38000000
liter_per_time_forbruk = 10

#ELRS/ELEH spesifikasjoner

kwhhlading = 350
batteri_nominell = 587

#Korreksjonsfaktorer

ekstra_vinterforbruk = 1
batteri_slitasje = 1
ladereduksjon = 1

#Skriv inn turnus

startkjøre1 = 0
startlade1 = 10

startkjøre2 = 12
startlade2 = 22

startkjøre3 = 24
startlade3 = 24

startkjøre4 = 0
startlade4 = 0

startkjøre5 = 0

#Energiberegning, omgjøring til prosent

batteri = batteri_nominell * batteri_slitasje
kwhhforbruk = (virkningsgrad_dieselmotor * energi_per_liter_diesel * liter_per_time_forbruk) / 3600000
forbruk = (kwhhforbruk / batteri) * ekstra_vinterforbruk * 100
lading = (kwhhlading / batteri) * ladereduksjon * 100
lading_korr = kwhhlading * ladereduksjon

#Algebra

#SYKLUS 1

ystartkjøre1 = 100
ystartlade1 = ystartkjøre1 - (startlade1 - startkjøre1) * forbruk

if ystartlade1 <= 0:
    tom1 = ystartkjøre1 / forbruk
    ytom1 = 0
    ystartlade1 = 0
else:
    ystartlade1 = ystartkjøre1 - (startlade1 - startkjøre1) * forbruk
    tom1 = startlade1
    ytom1 = ystartlade1
```

```
ystartkjøre2 = ystartlade1 + (startkjøre2 - startlade1) * lading

if ystartkjøre2 >= 100:
    fulladet1 = ((100 - ystartlade1) / lading) + startlade1
    yfulladet1 = 100
    ystartkjøre2 = 100
else:
    ystartkjøre2 = ystartlade1 + (startkjøre2 - startlade1) * lading
    fulladet1 = startkjøre2
    yfulladet1 = ystartkjøre2

#SYKLUS 2

ystartlade2 = ystartkjøre2 - (startlade2 - startkjøre2) * forbruk

if ystartlade2 <= 0:
    tom2 = (ystartkjøre2 / forbruk) + startkjøre2
    ytom2 = 0
    ystartlade2 = 0
else:
    ystartlade2 = ystartkjøre2 - (startlade2 - startkjøre2) * forbruk
    tom2 = startlade2
    ytom2 = ystartlade2

ystartkjøre3 = ystartlade2 + (startkjøre3 - startlade2) * lading

if ystartkjøre3 >= 100:
    fulladet2 = ((100 - ystartlade2) / lading) + startlade2
    yfulladet2 = 100
    ystartkjøre3 = 100
else:
    ystartkjøre3 = ystartlade2 + (startkjøre3 - startlade2) * lading
    fulladet2 = startkjøre3
    yfulladet2 = ystartkjøre3

#SYKLUS 3

ystartlade3 = ystartkjøre3 - (startlade3 - startkjøre3) * forbruk

if ystartlade3 <= 0:
    tom3 = (ystartkjøre3 / forbruk) + startkjøre3
    ytom3 = 0
    ystartlade3 = 0
else:
    ystartlade3 = ystartkjøre3 - (startlade3 - startkjøre3) * forbruk
    tom3 = startlade3
    ytom3 = ystartlade3

ystartkjøre4 = ystartlade3 + (startkjøre4 - startlade3) * lading

if ystartkjøre4 >= 100:
    fulladet3 = ((100 - ystartlade3) / lading) + startlade3
    yfulladet3 = 100
    ystartkjøre4 = 100
else:
    ystartkjøre4 = ystartlade3 + (startkjøre4 - startlade3) * lading
    fulladet3 = startkjøre4
    yfulladet3 = ystartkjøre4

#SYKLUS 4
```

```

ystartlade4 = ystartkjøre4 - (startlade4 - startkjøre4) * forbruk

if ystartlade4 <= 0:
    tom4 = (ystartkjøre4 / forbruk) + startkjøre4
    ytom4 = 0
    ystartlade4 = 0
else:
    ystartlade4 = ystartkjøre4 - (startlade4 - startkjøre4) * forbruk
    tom4 = startlade4
    ytom4 = ystartlade4

ystartkjøre5 = ystartlade4 + (startkjøre5 - startlade4) * lading

if ystartkjøre5 >= 100:
    fulladet4 = ((100 - ystartlade4) / lading) + startlade4
    yfulladet4 = 100
    ystartkjøre5 = 100
else:
    ystartkjøre5 = ystartlade4 + (startkjøre5 - startlade4) * lading
    fulladet4 = startkjøre5
    yfulladet4 = ystartkjøre5

#Koordinater

x = np.array([startkjøre1, tom1, startlade1, fulladet1, startkjøre2, tom2, startlade2,
fulladet2,
            startkjøre3, tom3, startlade3, fulladet3, startkjøre4, tom4, startlade4, f
ulladet4, startkjøre5])

y = np.array([ystartkjøre1, ytom1, ystartlade1, yfulladet1, ystartkjøre2, ytom2, ystart
lade2, yfulladet2,
            ystartkjøre3, ytom3, ystartlade3, yfulladet3, ystartkjøre4, ytom4, ystartl
ade4, yfulladet4, ystartkjøre5])

#NULLSTILLE UBRUKTE SYKLUSER

if startkjøre2 == 0:
    x = x[0:-14]
    y = y[0:-14]

elif startkjøre3 == 0:
    x = x[0:-10]
    y = y[0:-10]

elif startkjøre4 == 0:
    x = x[0:-6]
    y = y[0:-6]

#20% linje

x1 = np.arange(0, 25)
y1 = x1*0 + 20

#Print graf

fig = plt.figure(figsize=(14,5.5))
ax = fig.add_subplot(1, 1, 1)
plt.plot(x, y, 'b')

```

```
#Dupliser grafen med grafen med forsinkelse i x-retning
```

```
#plt.plot(x+2, y, 'g--')  
#plt.plot(x+4, y, 'g--')  
#plt.plot(x+6, y, 'g--')
```

```
#Rutenett
```

```
plt.plot(x1, y1, 'r--')
```

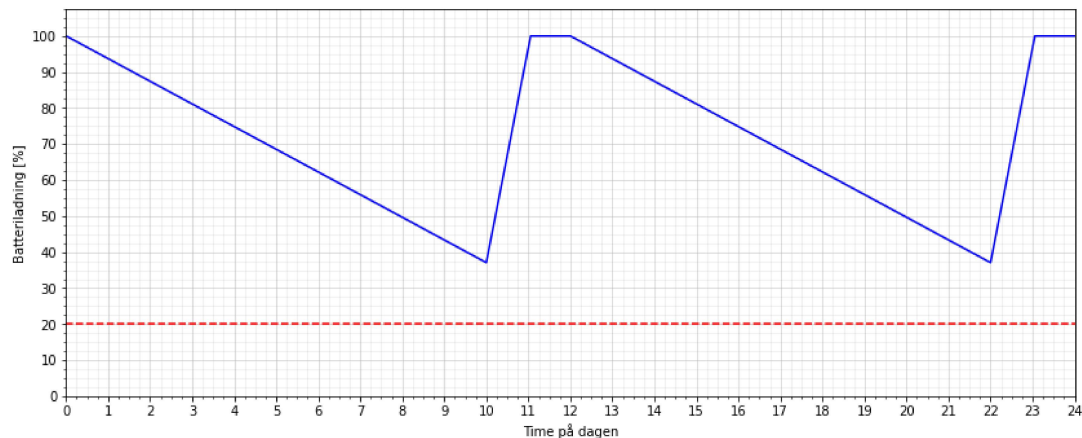
```
tykk_linjex = np.arange(0, 48, 1)  
tynn_linjex = np.arange(0, 48, 0.25)
```

```
tykk_linjey = np.arange(0, 110, 10)  
tynn_linjey = np.arange(0, 110, 2.5)
```

```
ax.set_xticks(tykk_linjex)  
ax.set_xticks(tynn_linjex, minor=True)  
ax.set_yticks(tykk_linjey)  
ax.set_yticks(tynn_linjey, minor=True)
```

```
ax.grid(which='minor', alpha=0.2)  
ax.grid(which='major', alpha=0.5)
```

```
plt.margins(x=0)  
plt.xlabel("Time på dagen")  
plt.ylabel("Batteriladning [%]")  
plt.show()
```



```
In [ ]:
```

```
In [ ]:
```