

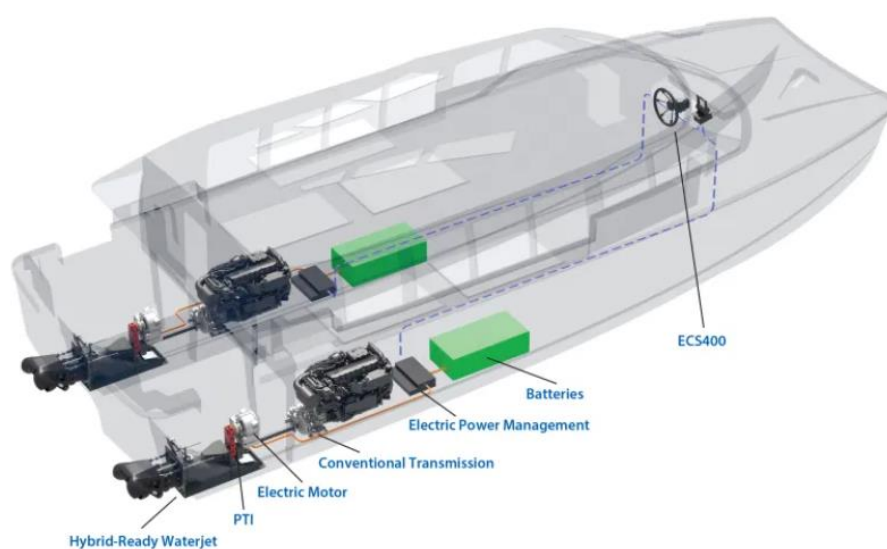
Beregnet til
Skyss

Dokument type
Vedlegg 1 til hovedrapport

Dato
Februar 2021- revidert

BERGEN – KNARVIK

REDUKSJON AV UTSLIPP VED BRUK AV HYBRID.



**BERGEN – KNARVIK
REDUKSJON AV UTSLIPP VED BRUK AV HYBRID.**

Vedlegg 1 til hovedrapport

Oppdragsnavn **Elektriske bybåter i Bergen, hybrid til Knarvik**
Prosjekt nr. **1350041567**
Mottaker **Skyss/Kringom**
Dokument type **Vedlegg 1 til hovedrapport**
Versjon **5**
Dato **08.02.2021**
Utført av **Dag Øvrebø**
Kontrollert av **Lars Ole Ødegaard**
Godkjent av **Lars Ole Ødegaard**
Beskrivelse **I prosjekt Elektriske bybåter i Bergen er det vurdert en hybridløsning for hurtigbåten til Knarvik/Frekhaug. Det er fordi det per januar 2021 er vanskelig å anbefale en helelektrisk løsning for denne ruta, gitt forutsetningen om å bruke eksisterende rutetider. De gir for korte ladetider.**

Revidert versjon med oppdaterte tall for effekt og forbruk dagens båt.

Rambøll
Harbitzalléen 5
Postboks 427 Skøyen
0213 Oslo

T +47 22 51 80 00
<https://no.ramboll.com>

INNHALDSFORTEGNELSE

1.	Introduksjon	2
2.	Ruten i dag	2
3.	Hybrid konsept – metode	4
4.	Resultater – lading i Bergen	6
4.1	Uendret rutetid	6
4.2	Endring av rutetid	8
5.	Resultater – lading i Knarvik	9
6.	Konklusjon	10

1. INTRODUKSJON

Skysst har gitt Rambøll i oppdrag å se på hva man kan oppnå med bruk av en diesel – batterielektrisk hybrid løsning Nordhordlandssambandet.

2. RUTEN I DAG

Ruten betjenes i dag av MS Fjordkatt som er en katamaran fra Brødrene Aa bygget i 2007. Båten er 27 m lang og hadde opprinnelig en kapasitet på 180 passasjerer. Dette er senere økt til 199. Servicefart er oppgitt til 30 knop og dieselmotorene er 2xMTU 10V2000 M72 CR som hver yter 750 kW i henhold til oppgitte data¹. Motorprodusenten oppgir at denne har et forbruk på 209 g/kWh² og har en maksimal ytelse på 900 kW I et filmintervju³ blir det sagt at motoren yter 1220 Hk (911 kW) og har en servicefart på 32 knop.



Figur 1 MS Fjordkatt (Kilde: Marinetransport)

Båten går i rute mellom Bergen – Frekhaug - Knarvik som vist i Tabell 1. Den gjennomfører 6 rundturer på hverdager eller 30 rundturer/uke. Dette er en ren pendlerrute som ikke går i helgene og også blir innstilt på bevegelige helligdager og i fellesferien.

Tabell 1 Rutetider for Bergen-Frekhaug-Knarvik

Knarvik kai	05.53	06.50	07.50	08.50	–	15.04	16.00
Frekhaug kai	05.59	06.56	07.56	08.56	–	–	–
Strandkaien	06.20	07.17	08.17	09.17	–	15.26	16.22
Strandkaien	06.22	07.22	08.22	–	14.36	15.30	16.30
Frekhaug kai	–	–	–	–	14.57	15.51	16.51
Knarvik kai	06.44	07.44	08.44	–	15.03	15.57	16.57

¹ [https://no.wikipedia.org/wiki/MS_%C2%ABFjordkatt%C2%BB_\(2006\)](https://no.wikipedia.org/wiki/MS_%C2%ABFjordkatt%C2%BB_(2006))

² Motor datablad fra MTU

³ <https://www.skipsrevyen.no/article/ukens-skipsbesoek-ms-fjordkatt/>

Rambøll har ikke funnet oppgitt forbruk for denne båten eller ruten. Det er også uklart hvilken fart båten holder (30 eller 32 knop). Marine traffic viser at båten er oppe i 32,4 knop under overfart og Rambøll har derfor lagt til grunn at båten har en servicefart på 32 knop. Ifølge Rambøll sin egen modell vil en slik båt ha et effektbehov på 1493 kW ved 32 knop hvilket tilsvarer et forbruk på 367 liter/time eller 6,61 liter/km. Avstander benyttet til beregning av energiforbruk er vist i Tabell 2. Ifølge rutetabellen går båten innom Frekhaug kun en av veiene slik at total distanse på en rundtur blir 36 km hvilket gir et forbruk på 230 liter/rundtur. Med 6 turer/dag gir det et daglig forbruk på 1380 liter.

Tabell 2 Avstander mellom stoppesteder

<u>Rutedata</u>	
Bergen - Knarvik	17,8 km
Bergen - Frekhaug	14,7 km
Frekhaug - Knarvik	3,5 km
Lengde 5 knop sone [km]	1,05 km

Ruten går 5 dager i uken og hvis vi antar 48 driftsuger/år gir dette et årlig forbruk på 331 284 liter/år eller 282 tonn diesel/år. DNV beregnet at forbruket til denne båten var 220 tonn MGO/år, men de la til grunn at hastigheten var 30 knop. Ved 30 knop får Rambøll et årlig forbruk på 241 tonn/år hvilket stemmer bra med DNV sine beregninger.

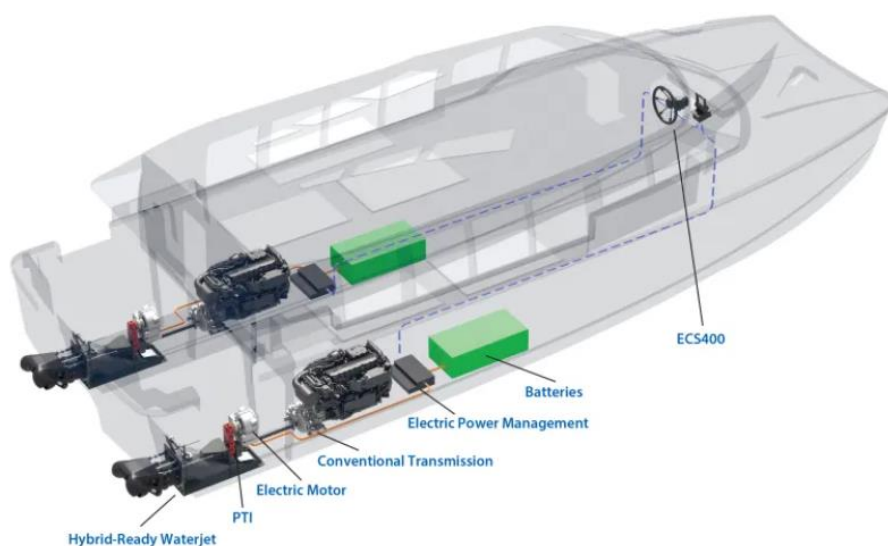
Et slikt forbruk tilsvarer et utslipp av 888 tonn CO₂/år.

Ifølge Rambøll sine beregninger er det heller ikke mulig å holde rutetiden og samtidig fartsgrensen på 5 knop i en sone inn og ut fra Bergen (Vågen) dersom servicefart er 32 knop. Data fra Marine traffic viser også at båten holder 7,4 knop i 5 knop sonen.

Ved å benytte et fartøy som har 34 knop som servicefart er det mulig å holde rutetiden og samtidig fartsgrensen i 5 knop sonen inn og ut av Bergen.

3. HYBRID KONSEPT – METODE

Det finnes en rekke forskjellige løsninger for hybrid drift. Rambøll har i denne studien valgt en løsning hvor både dieselmotor og elektrisk motor gir fremdriftskraft, men hvor elektrisk kraft blir hentet fra batteriene. Dieselmotoren leverer kraft direkte på akslingen slik at man unngår tap i generator. En slik løsning er vist i Figur 2.



Figur 2 Hybrid konsept i denne studien – dieselmotor har direkte drift på propellaksling (Kilde: Plugboats)

Utgangspunktet er en 40m katamaran med 270 PAX. Det er videre lagt til grunn at maksimal størrelse på batteri i et *helelektrisk fartøy* på denne størrelsen er 6 MWh med dagens batteri teknologi. I en hybrid versjon vil en del av batteriet bli erstattet av dieselmotor(er) med direkte drift på propell. Løsningen er optimalisert slik at mest mulig energi leveres fra batteriet hvor begrensingen er batterikapasiteten.



Figur 3 MTU motor benyttet som utgangspunkt for beregning av dieselforbruk og spesifikk vekt.

For å beregne spesifikk vekt av dieselmotor er en motor fra MTU med betegnelsen 12V2000M72 benyttet som eksempel. Den har en maksimal effekt på 1080 kW og det er antatt at belastning

ved servicefart er 80% av dette. Motor med gearkasse veier 3 680 kg hvilket gir en spesifikk vekt på 4,26 kg/kW.

Forbruket på dette punktet er oppgitt til 209 g/kWh og vil også bli brukt i beregningene. I modellen er det antatt at spesifikk vekt for dieselmaskineri er uavhengig av hvor mange motorer som faktisk er installert. Begrepet «dieselmotor» er brukt gjennomgående i denne rapporten uavhengig av om båten vil ha en eller flere dieselmotorer. Vekten på dieselmaskineri blir beregnet ut ifra effekt på dieselmotor, resten av vekten fordeles på batteri og dieseltank slik at totalvekten er uendret. En større dieselmotor gir derfor et mindre batteri.

Båten har et beregnet effektbehov på 2 885 kW ved servicefart på 34 knop. Øvrige inngangsdata og beregninger er gitt i Tabell 3 nedenfor. Energitetthet på batteri er antatt å ligge på 5,7 kg/kWh. Dette er dagens spesifikke vekt for en marin batteripakke og det er forventet at denne vil synke noe de neste årene, men det er det ikke tatt høyde for her.

Tabell 3 Data for beregning ruten Bergen – Knarvik med hybrid.

Bergen - Knarvik			
Inngangsdata		Beregninger	
<u>Båt</u>			
PAX - 40m båt	270	Effekt servicefart	2 885
Servicefart	34,00	Energiforbruk sf	45,81 kWh/km
Energiforbruk 5kn	11,00 kWh/km	Spesifikk vekt dieselmotor	4,26 kg/kW
Effy batteri-motor	0,90	Dieseltank	0,21 kg/kWh
Effy lader- batteri	0,93	Motor effy	37,94 %
Effekt dieselmotor	1 200 kW	Tillatt totalvekt	34 200 kg
Diesel tank	1 500 ltr	Vekt dieselmotor	-5 111 kg
Spesifikk vekt batteri	5,70 kg/kWh	Vekt diesel	-1275 kg
Ladeeffekt batteri	1500 kW	Vekt batteri =	27 814 kg
<u>Data for beregning av spesifikk vekt dieselmotor</u>		Batterikapasitet	4 880 kWh
Motor MTU 16V2000M72	3 680 kg	Ladeeffekt nettstasjon	1 613 kW
Effekt ved 80% belastning	864 kW		

Rutedata benyttet i modellen er vist i Tabell 4. Det er videre antatt at båten trenger $\frac{3}{4}$ minutt for manøvrering ved ankomst. Tid for akselerasjon og retardasjon er beregnet å være $\frac{1}{2}$ minutt hver og tilbakelagt distanse for akselerasjon og retardasjon til sammen er 500 m. Nødvendig effekt ved servicefart er 2885 kW, vesentlig mer enn dagens båt. Det skyldes at dagens båt er mindre og har en servicefart på 32 knop. Økt vekt av batteripakke bidrar også til større effektbehov.

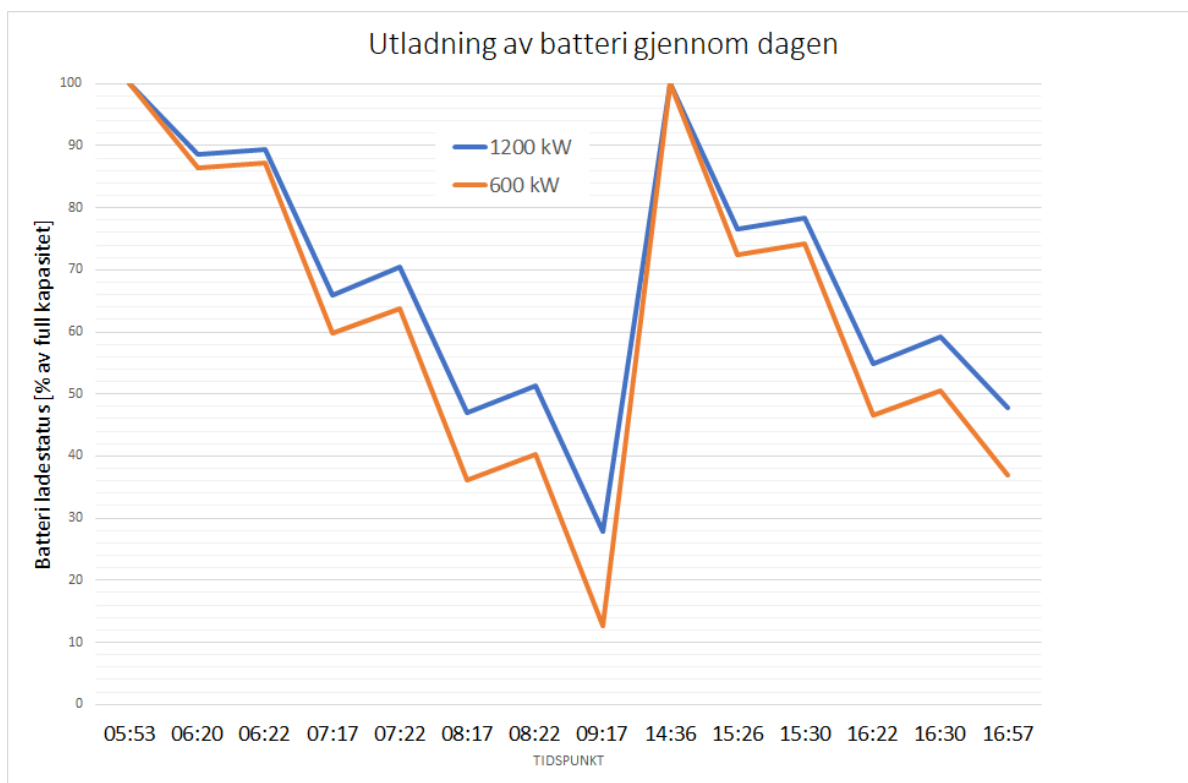
Tabell 4 Rutedata for modell

Rutedata	
Bergen - Knarvik	17,8 km
Bergen - Frekhaug	14,7 km
Frekhaug - Knarvik	3,5 km
Lengde 5 knop sone [km]	1,05 km
Manøvrering ankomst	0,75 min
Fart i 5 knop sone	5 knop

4. RESULTATER – LADING I BERGEN

4.1 Uendret rutetid

I modellen er rutetidene holdt uforandret. Båten starter om morgenen kl 05:53 fra Knarvik med fullt batteri. Det betyr at båten saktelades over natten i Knarvik. Det er lagt inn 1 min stopp på Frekhaug. Deretter går båten til Strandkaaien og ligger i 2 minutter før den går tilbake til Knarvik. Det er denne første avgangen som er dimensjonerende for servicefart, og båten må holde 34 knop for å komme tidsnok inn til Strandkaaien. Alle liggetider i Bergen er i henhold til rutetid. Båten lades med 1,5 MW hver gang den ligger ved Strandkaaien og det er lagt inn at man trenger ½ minutt for tilkobling av ladeplugg hver gang den lades. Når båtene går med servicefart på 34 knop går dieselmotoren på konstant effekt og bidrar til å redusere energiuttaket fra batteriet. Under manøvrering og i 5 knop sonen er ikke dieselmotoren i drift da effektbehovet ikke er optimalt for dieselmotoren. Dette bidrar også til å redusere utslipp inne i bysonen. På grunn av kort oppholdstid ved Strandkaaien blir batteriet gradvis tappet utover morgenen og når en bunn når den legger til kai i Bergen kl 09:17 hvor den blir liggende og lade til ettermiddagsruten begynner. Figur 4 viser ladestatus gjennom dagen med henholdsvis 600 kW og 1200 kW fra dieselmotor.



Figur 4 Ladestatus for batteriet gjennom dagen. Lading kun i Bergen.

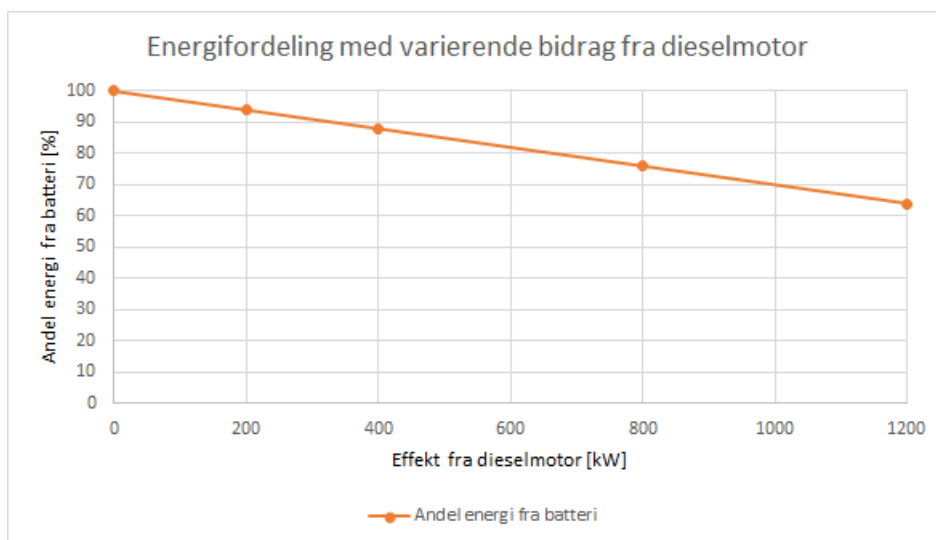
Med 600 kW blir batteriet ladet ut til 12%, noe som vil fungere når batteriet er nytt. Etter hvert som det blir eldre vil kapasiteten reduseres og restenergi reduseres tilsvarende. Levetiden til et batteri er normalt definert til når det har mistet 20% av opprinnelig kapasitet. Derfor er 600 kW fra dieselmotor ikke tilstrekkelig over tid, mens 1200 kW fra dieselmotor vil gi en bedre margin over tid ettersom man har 28% igjen (SoC⁴) på det laveste punktet (72% DoD⁵). Det er vanskelig å anslå levetid da batteriet har hyppige ladesesjoner gjennom dagen, men med 1200 kW fra dieselmotor bør man kunne oppnå 10 års levetid og fremdeles ha tilfredsstillende restkapasitet etter turene om morgenen. I dette tilfellet er ladeeffekt 1,5 MW til batteri hvilket vil tilsvare 1,6 MW fra nettstasjon på grunn av tap i likeretter og lader.

For å lade opp batteriet over natten i Knarvik er nødvendig ladeeffekt beregnet til 185 kW.

En hybrid løsning reduserer forbruk av diesel og CO₂ utslipp da en del av energien er fornybar elektrisitet. Ved et bidrag på 1200 kW utgjør energien fra batteriet 64% av total energi. Sammenhengen mellom effekt fra dieselmotor og reduksjon i dieselforbruk er vist i Figur 5 nedenfor. Ved 1200 kW bidrar dieselmotoren med 42% av effekten båten trenger ved servicefart, mens energibidraget totalt fra dieselmotoren utgjør 36%. Dette er fordi den ikke er i drift i 5 knopsonen.

⁴ SoC: State of Charge

⁵ DoD: Depth of Discharge



Figur 5 Reduksjon i energi fra batteri i forhold til effekt på dieselmotor

Daglig forbruk av diesel er beregnet til 955 liter, dette er 425 liter mindre enn dagens båt bruker. En hybridløsning vil derfor resultere i en reduksjon på 31% i forhold til dagens båt. Denne sammenligningen er ikke helt rettferdig fordi den nye båten vil ha kapasitet på 270 PAX, mens eksisterende har 199 PAX, men gir et bilde på hva man kan oppnå med hybridisering.

4.2 Endring av rutetid

Hvis det er mulig å starte første tur om morgenen noe tidligere kan man få litt lenger ladetid i Bergen. Hvis første avgang starter 05:48, 5 min tidligere enn i dag vil man få tilsvarende lenger ladetid i Bergen. Dette gjør at båten har 30% kapasitet igjen (70% DoD) på batteriet når den legger til kai 09:17 om morgenen. Dette er 2% høyere enn ved vanlig start på morgenen fra Knarvik. Dette betyr at 5 min tidligere start har en positiv effekt, men ikke mer enn at batteriet lades ut 2% mindre.

En viktigere effekt av å starte 5 min tidligere er at båten kan redusere servicefart for å holde rutetiden. Som nevnt tidligere er det den første avgangen som bestemmer nødvendig servicefart. Ved å starte 5 min tidligere og bruke 2 min lenger tid på ruten er det de andre avgangene som bestemmer nødvendig servicefart. Nødvendig servicefart kan på denne måten reduseres til 31 knop. Dette reduserer effektbehovet ved servicefart fra 2 885 kW til 2 235 kW, en reduksjon på 23%. Ankomst til Bergen på første rute blir da 06:17, 3 min før vanlig rutetid.

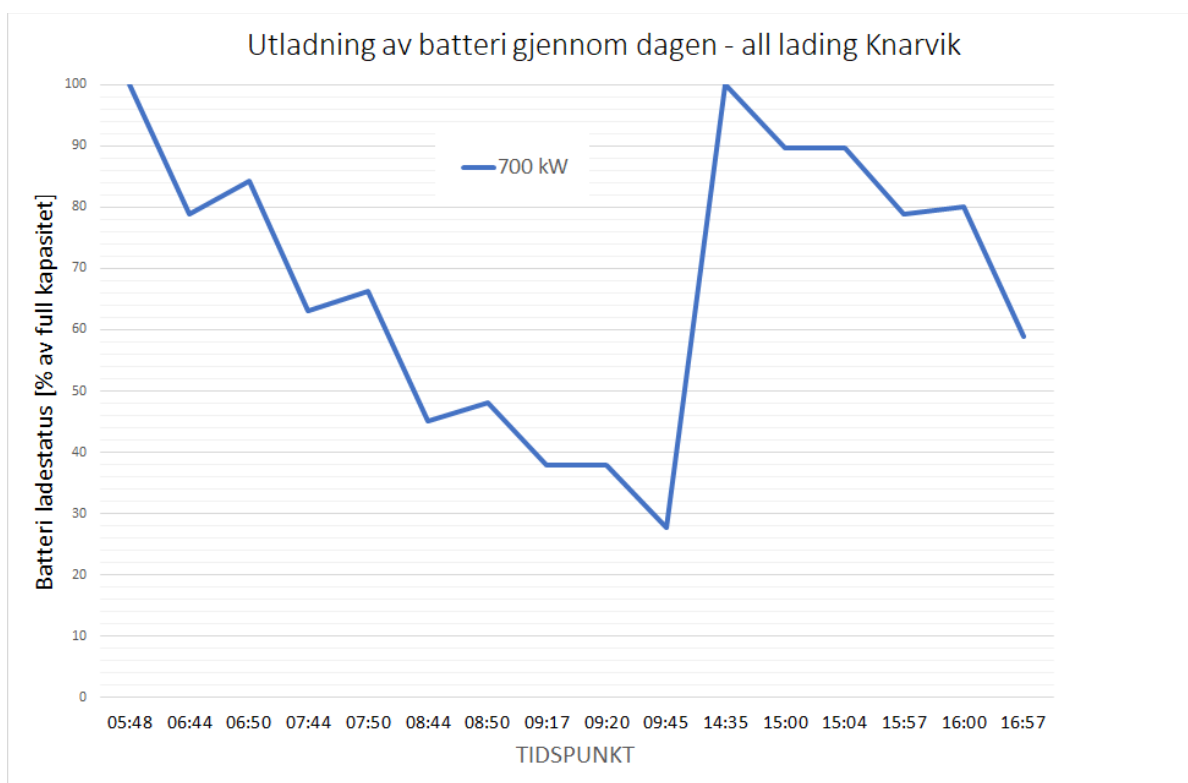
Dette har en vesentlig innvirkning på energiforbruket. Båten kan nå klare ruten med 500 kW dieselmotoreffekt for ikke å komme under 28% energinivå i batteriet. Daglig dieselbruk er nå nede i 436 liter, en reduksjon på 54% i forhold til å holde vanlig rutetid med 34 knop fart. Reduksjon i forhold til dagens båt blir på 68%. Det er svært energikrevende å holde høy fart med en hurtigbåt med standard katamaranskrog.

5. RESULTATER – LADING I KNARVIK

I stedet for å lade i Bergen om dagen og saktelading i Knarvik gjennom natten kan det være aktuelt å utføre all lading i Knarvik. Fordelen med et slikt alternativ er at båten ikke trenger ladeinfrastruktur ved Strandkaian. Ulempen er at man ikke får benyttet oppholdet i Bergen mellom morgen og ettermiddagsrutene til å lade opp båten. Den må derfor klare seg hele dagen med energien den får fra Knarvik. Ettersom 5 min tidligere avgang fra Knarvik om morgenen har stor betydning for servicefart og forbruk av diesel har vi valgt å benytte dette som utgangspunkt for alternativ med all lading på Knarvik.

Resultatene viser at man med en slik løsning må øke dieselmotoreffekten fra 500 kW til 1400 kW for å ha tilstrekkelig med batterikapasitet fordi båten ikke kan benytte oppholdet midt på dagen til å lade i Bergen. Dette gir et daglig dieselforbruk på 1222 liter som er bare litt lavere enn dagens forbruk på 1380 liter og er mindre gunstig.

En løsning kan være å la båten ta en ekstra tur til Knarvik etter at morgenrutene er gjennomført. Den kan da lade i Knarvik i 4,5 timer før den returnerer til Bergen for å starte opp med ettermiddagsrutene. På grunn av ekstra turen tilbake til Knarvik må man ha mer dieselenergi enn for lading i Bergen. For å ha samme margin som med lading i Bergen vil det være nødvendig å øke dieselmotoreffekten fra 500 kW til 700 kW.



Figur 6 Utladning gjennom dagen med lading i Knarvik. Båten tar også en ekstra tur til Knarvik midt på dagen for å lade

Ladestatus (SoC) gjennom dagen for dette tilfellet er vist i Figur 6. Daglig forbruk av diesel blir 657 liter, en reduksjon på 52% i forhold til dagens båt.

6. KONKLUSJON

En hybridløsning kan være aktuelt for ruten mellom Bergen og Knarvik. I modellen er det forutsatt at fartøyet opererer helelektrisk i 5 knop sonen. Ved servicefart vil dieselmotoren gå på konstant effekt og avlaste batteriet. Båten må ha en servicefart på 34 knop utenfor 5 knop sonen for å holde dagens rutetider (på første tur) og beregnet effekt ved servicefart er 2885 kW.

Ved lading i Bergen vil 1200 kW fra dieselmotor være tilstrekkelig for å operere ruten. På det laveste vil batteriet ha 28% igjen av kapasitet. Det inntreffer når båten kommer til Bergen kl 09:17 før den starter opplading for ettermiddagsrutene. Selv om 64% av energien kommer fra batteriene er reduksjonen i dieselforbruk på 31% i forhold til dagens båt på grunn av økt energiforbruk totalt for en større båt som må gå raskere enn dagens båt.

Dersom man kan starte første avgang fra Knarvik 5 min tidligere kan servicefarten reduseres til 31 knop og nødvendig effekt ved servicefart kan reduseres med 23%. Dette gjør at nødvendig effekt fra dieselmotorene kan reduseres fra 1200 kW til 500 kW og et daglig forbruk av diesel på 436 liter gir en reduksjon på 68% i forhold til dagens båt.

Et alternativ er å utføre all lading på Knarvik slik at man slipper å etablere ladeinfrastruktur på Strandkaaien. Ulempen er at man ikke får benyttet opphold midt på dagen til å lade opp batteriene. Det betyr at man trenger 1400 kW med diesel effekt for at batteriet skal holde hele dagen og daglig forbruk av diesel blir nesten like høyt som dagens. Dersom båten returnerer til Knarvik midt på dagen for å lade kan den klare jobben med 700 kW diesel effekt og et daglig dieselforbruk på 657 liter og en reduksjon på 52% i forhold til dagens båt. Det inkluderer imidlertid en ekstra avgang til Knarvik morgen og ettermiddag.

Det kan være et alternativ å etablere et sakteladingsanlegg et sted i Vågen, for daglading i stedet for å returnere til Knarvik. Det er ikke regnet på en slik løsning.

Hvis sambandet til Kleppstø også blir elektrifisert, kan man vurdere å kryssbytte båter etter siste tur til Bergen om morgenen, og la båten gå til Kleppstø for å daglade. Det forutsetter ladeinfrastruktur for 2 båter på Kleppstø. Det er ikke regnet på den mulige løsningen.

REFERANSER
[APPENDIX TITTEL]