



Energieffektiv og klimavennlig ferjedrift

Etatsprogram Lavere energiforbruk i Statens vegvesen (LEIV),
2013-2017

STATENS VEGVESENS RAPPORTER

Nr. 473

Tor Myklebust



Tittel

Energieffektiv og klimavennlig ferjedrift
(potensiellstudie)

Undertittel

Etatsprogram Lavere energiforbruk i Statens
vegvesen (LEIV), 2013-2017

Forfatter

LMG Marin (Torbjørn Bringedal), CMR Proto-
tech og Norsk Energi

Avdeling

Trafikksikkerhet, miljø- og teknologiavdelin-
gen

Seksjon

ITS

Prosjektnummer

603612

Rapportnummer

Nr. 473

Prosjektleder

Edvard Sandvik

Godkjent av

Bob Hamel

Emneord

Ferje, ferjedrift, energiforbruk, energieffektivi-
sering, CO2, utslippsreduksjon

Sammendrag

Statens vegvesen bruker mye energi. Både gjennom strøm og fossilt brennstoff. Statens vegvesen har derfor satt i gang et etatspro-
gram som heter «Lavere energiforbruk i Statens vegvesen (LEIV)». Hensikten med etatsprogrammet er å senke energiforbruket i Statens vegvesen og i tjenester som Statens vegvesen kjøper inn. Bakgrunnen er både miljømessig og økonomisk.

En av arbeidspakkene i etatsprogrammet handler om ferjer. I sammenheng med dette har Statens vegvesen utredet potensiale for energieffektiv og miljøvennlig ferjedrift. Denne rapporten beskriver funnene som ble gjort.

Title

Energy efficient and climate friendly ferry
operations (potential study)

Subtitle

Lower energy consumption in the Norwegian
Public Roads Administration, 2013-2017

Author

LMG Marin (Torbjørn Bringedal), CMR Proto-
tech and Norsk Energi

Department

Traffic Safety, Environment and Technology
Department

Section

ITS

Project number

603612

Report number

No. 473

Project manager

Edvard Sandvik

Approved by

Bob Hamel

Key words

Ferry, ferry operations, energy consumption,
energy efficiency, CO2, emission reduction

Summary

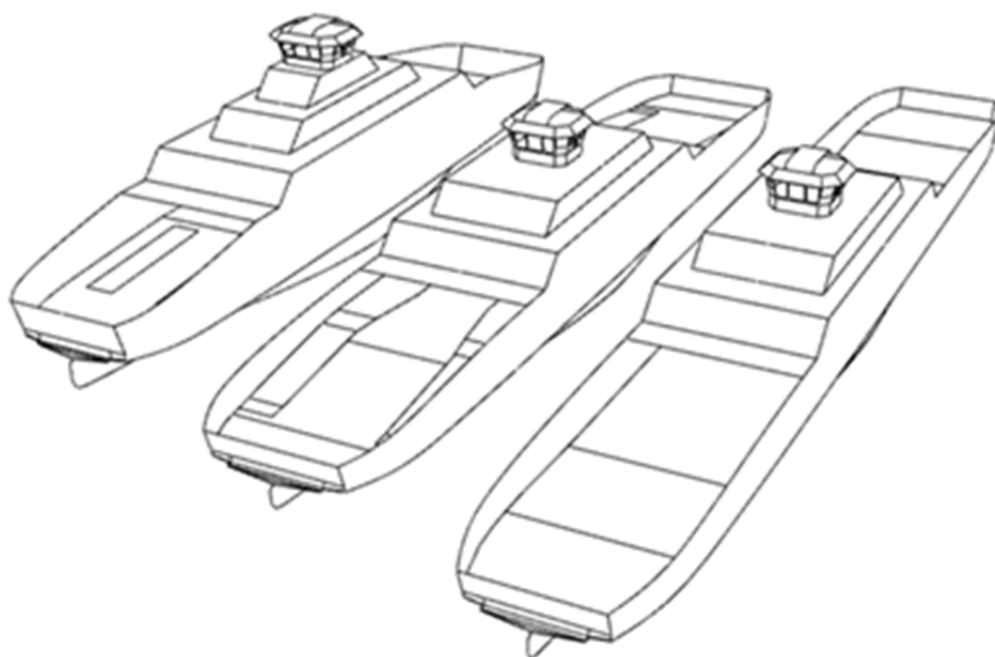
The Norwegian Public Roads Administra-
tion (NPRA) uses a lot of energy. Both with
electricity and fossil fuels. NPRA has therefore
initiated a research and development program
called "Lower energy consumption in NPRA
(LEIV)." The purpose of the R&D program is
to reduce energy consumption in NPRA and
services NPRA is purchasing. The reason is
both environmentally and economically.

One of the work packages in the R&D pro-
gram is ferry operations. In this context, the
Norwegian Public Roads Administration has
investigated the potential for energy efficient
and climate friendly ferry operations. This
report describes the findings.

POTENSIALSTUDIE ENERGIEFFEKTIV OG KLIMAVENNLIG FERGEDRIFT

OPPSUMMERINGSRAPPORT

**UTFØRT AV LMG MARIN, CMR PROTOTECH OG NORSK ENERGI
PÅ OPPDRAG FOR STATENS VEGVESEN**



Dok. nr.: 349008-R-001

Revisjon: 03

Bergen, 02.10.2015

Kunde : STATENS VEGVESEN

Nøkkelperson : EDVARD THONSTAD SANDVIK

Dokument tittel : POTENSIALSTUDIE - ENERGIEFFEKTIV OG KLIMAVENNLIG FERGEDRIFT

Prosjekt navn : OPPSUMMERINGSRAPPORT

Prosjekt nummer : 349008

Internt dokumentnummer : 349008-R-001

Kundens dokumentnummer : N/A

Ekstern distribusjon : SVV, FYLKESKOMMUNER, ENOVA

Gradering : INGEN

03	02.10.15	TB	MRI	GTR	Oppdatert iht. kundes kommentarer
02	16.07.15	TB	FCO	GTR	Oppdatert iht. interne og kundes kommentarer
01	06.06.15	TB	FCO	GTR	Første utgave, for kommentarer
Revisjon	Dato	Av	Sjekket	Godkjent	Kommentarer

INNHold

1. SAMMENDRAG	1
2. INNLEDNING	3
3. MÅLSETNING	3
4. ANVENDT TEKNOLOGI	4
4.1 ENERGIKILDER OG ENERGIBÆRERE	4
4.1.1 FOSSILT BRENSSEL	4
4.1.2 BIODRIVSTOFF	5
4.1.3 ELEKTRISITET FRA NETT	5
4.1.4 HYDROGEN	6
4.2 SKROGKONSEPTER	6
4.2.1 ENKELTSKROG I STÅL	7
4.2.2 ENKELTSKROG I ALUMINIUM	8
4.2.3 KATAMARAN I STÅL	8
4.2.4 KATAMARAN I ALUMINIUM	9
4.3 MASKINERI FREMDRIFTSLØSNINGER, ENERGILAGRING OG ENERGIBÆRERE	10
4.3.1 DIESELMEKANISK FREMDRIFT	10
4.3.2 GASSELEKTRISK FREMDRIFT	10
4.3.3 DIESEL/BATTERI HYBRIDFREMDRIFT	11
4.3.4 GASS/BATTERI HYBRIDFREMDRIFT	13
4.3.5 HYDROGENDRIFT	13
4.3.6 BATTERIFERGE	13
4.4 GENERELLE ENERGIEFFEKTIVISERENDE OG KLIMAVENNLIGE TILTAK	14
4.4.1 TILTAK FOR SPART TIDSBruk VED KAI	15
4.4.2 TILTAK FOR REDUSERT FREMDRIFTSEFFEKT	16
4.4.3 TILTAK FOR REDUSERT ENERGIFORBRUK TIL HJELPESYSTEM & HOTELL	17
4.4.4 TILTAK FOR REDUSERT KLIMABELASTNING	19
5. GENERELLE TRENDER OG RESULTAT	21
5.1 VARIERENDE ANTALL OG STØRRELSE FERGER PÅ TYPISK SAMBAND	22
5.2 VARIERENDE SKROGKONSEPT FOR TYPISK SAMBAND	24
5.3 VARIERENDE FART OG FERGESTØRRELSE FOR TYPISK SAMBAND	27
5.4 VARIERENDE DISTANSE FOR TYPISK FERGE	30
5.5 GENERELLE ENERGIEFFEKTIVISERENDE TILTAK	31
5.6 ENERGIEFFEKTIVISERING MED PLUGG-INN HYBRIDFERGE	34
5.7 BEGRENSENINGER FOR REN BATTERIFERGE	36
5.8 SAMMENLIGNING MED IDENTISK RUTETABELL	37
6. ANVENDT METODE, IDEALISERINGER OG ANTAGELSER	38
6.1 DATABASE	38
6.2 MOTSTAND, FREMDRIFT OG ENERGIUTNYTTELSE	38

6.2.1	SKROGMOTSTAND	38
6.2.2	FREMDRIFT	39
6.2.3	ENERGIUTNYTTELSE	41
6.3	DRIFTSPROFIL.....	41
6.4	SPESIFIKT BRENNSTOFF FORBRUK.....	42
6.4.1	FREMDRIFT	42
6.4.2	HJELPEMASKINERI	43
6.4.3	KJEL	43
6.5	LETTSKIP OG DØDVEKT.....	44
6.5.1	LETTSKIP	44
6.5.2	DØDVEKT/NYTTTELAST	44
6.6	BRUKT TID I HAVN.....	44
6.7	BRUK AV LANDSTRØM	44
6.7.1	NORMAL LANDSTRØM	44
6.7.2	HØYKAPASITET LANDSTRØM	45
6.8	BRUK AV PROPULSJON I HAVN.....	45
6.9	TRAFIKKVARIASJON OVER DØGNET OG UKEN.....	45
6.10	UTNYTTELSE OG LADING AV BATTERI	45
6.11	EFFEKT AV «PEAK SHAVING».....	46
6.12	BEREGNING AV HYDROGEN HYBRIDKONSEPT.....	46
6.13	GENERELLE TILTAK	46
6.13.1	TILTAK OG «FLASKEHALSER» FOR BRUKT TID I HAVN	46
6.13.2	TILTAK FOR REDUSERT ENERGIFORBRUK TIL HJELPESYSTEMER OG HOTELL	47
6.13.3	TILTAK FOR REDUSERT ENERGIFORBRUK TIL PROPULSJON	49
6.13.4	TILTAK FOR REDUSERT UTSLIPP	49
6.14	INVESTERINGSKOSTNADER.....	50
6.14.1	TRADISJONELLE FERGER	50
6.14.2	HYBRIDFERGER	50
6.14.3	BATTERIFERGE	50
6.14.4	HYDROGENFERGE	50
6.14.5	KATAMARAN	51
6.14.6	ALUMINIUMSKROG	51
6.14.7	HØYHASTIGHETSFERGE	52
6.14.8	PRIS PER STØRRELSE FERGE	52
6.14.9	LANDSTRØM HØYKAPASITET	52
6.14.10	GENERELLE TILTAK	52
6.15	ENERGIKOSTNADER.....	53
7.	BRUKERINSTRUKSJON – DIGITALT VERKTØY.....	55
7.1	GENERELT	55
7.2	FERGE- OG RUTEDEFINISJON	55
7.3	RUTEPLAN DEFINISJON.....	59

7.4 KJØRING AV PROGRAM, RESULTATER & EKSPORT	60
APPENDIX A : HYDROGEN & BRENSELCELLER PÅ FERGER (CMR PROTOTECH)-----	62
A.1 HYDROGEN OG BRENSELCELLER	62
A.1.1 ULIKE BRENSELCELLETEKNOLOGIER	62
A.1.2 HYDROGEN SOM ENERGIBÆRER	63
A.1.3 HYDROGENPRODUKSJON VED VANNELEKTROLYSE BASERT PÅ FORNYBAR KRAFT	64
A.1.4 TEKNISK LØSNING OG BEREGNET KRAFT- OG ENERGIFORBRUK FOR 50 PBE FERGE	65
A.1.5 OPPSUMMERING, VURDERING AV IMPLEMENTERBARHET OG VIDERE ANBEFALINGER	67
APPENDIX B : KLIMA- OG MILJØVURDERING AV MARINE DRIVSTOFF (NORSK ENERGI) ----	69
B.1 METODIKK: LIVSLØPSANALYSE	69
B.2 DATA.....	69
B.3 RESULTATER FOR DE VURDERTE DRIVSTOFFENE	71
APPENDIX C : UTFYLLENDE OM ENERGIEFFEKTIVISERINGSTILTAK (NORSK ENERGI)-----	72
C.1 EKSOSKJEL MED KRAFTPRODUKSJON	72
C.2 VENTILASJON:	73
C.3 ENERGIBESPARENDE KJØKKENUTSTYR OG HVITEVARER	73
C.4 ENERGILEDELSE OG ENERGIOPPFØLGINGSSYSTEM	74
C.5 BELYSNING	74
APPENDIX D : KLIMAGASSBEREGNING (SVV/TRANSNOVA) -----	76
D.1 INNLEDNING	76
D.2 PRINSIPPER FOR OPPSTRØMS VURDERINGER.....	76

1. SAMMENDRAG

Dette dokumentet er en oppsummering av en studie som kartlegger muligheter som finnes for energieffektiv, klima- og miljøvennlig fergedrift. Utgangspunktet er det som i industrien generelt anses kommersielt tilgjengelig teknologi, samt et utvalg av nye teknologier som står på terskelen til å kunne anses kommersialisert. Studien er utført på oppdrag for Statens Vegvesen (SVV) av LMG Marin med samarbeidspartnere CMR Prototech og Norsk Energi (LMG Marin, CMR Prototech og Norsk Energi er samtlige tilknyttet den maritime klyngen MCT CleanTech).

Studien omfatter pendelferger i størrelse 20 til 290 PBE (personbilenheter) operert på typisk norske riksvei- og fylkessamband. Enkeltskrog og katamaran skrogkonsept bygget i stål eller aluminium er undersøkt med kombinasjoner av følgende alternative maskineri- energilager og/eller energibærerprinsipper:

- Dieselmekanisk fremdrift
- Gasselektrisk fremdrift
- Diesel/gasselektrisk batterihybrid løsninger
- Ren batteridrift
- Hydrogendrift

For gass- og dieseldrift omfatter studien undersøkelser med bruk av både fossilt og biologisk fremstilt drivstoff. Totalt er det utarbeidet en database på 236 ulike konsepter som gjennom studien undersøkes for ulike sambandsparametere (fart, distanse, avgangsfrekvens med mer).

Utover dette vurderes generelle tiltak for energieffektivisering og/eller utslippsreduksjon som kan tenkes implementert på et vilkårlig fergekonsept (eksempelvis eksoskjel varmegjenvinning, LED belysning, automatisk fortøyning, høyeffektiv propulsjon og liknende).

Noen trender som er observert:

- Store saktegående ferger er de mest energieffektive.
- Energieffektivitet øker med økende sambands lengde.
- Et enkeltskrogskonsept bygget i aluminium synes å være mest energieffektivt.
- Ren batteridrift er funnet å være mest klimavennlig. Ren batteridrift er dog ikke like godt egnet for alle typer samband og drift, og får utfordringer spesielt ved høy fart, lange distanser og/eller om rutetid ikke er tilpasset nødvendig ladetid.
- Landstrømkapasitet er en praktisk begrensning for batteriferger. Batteribuffer på land kan løse dette for en del tilfeller men blir mer utfordrende når flere batteriferger skal operere på samme samband.
- Plugg-in hybridferge er et fleksibelt konsept som med samme ferge kan operere i ulike scenarioer alt fra ren batteriferge for korte samband til hybridløsning uten landstrøm for lengre og ikke forberedte samband.
- Batteriferger bør kombineres med betydelig generelle energieffektiviserende tiltak for å bli kostnadseffektive (tiltak som delvis går utover mannskapskomfort og tilbud til passasjerer).
- Hydrogen representerer en mulig nullutslippsløsning men krever et demoprojekt og må ses i sammenheng med tilgang på drivstoffet. Er det mest klimavennlige alternativet hvor ren batteridrift ikke er mulig.

Batteriferge fremstår hvor denne teknologien er egnet som det mest attraktive alternativet både med hensyn på energieffektivitet og klimautslipp. Alternativene deretter for samband som ikke er

egnet for ren batteridrift er plugg-inn hybrid eller konvensjonelle maskineriløsninger på biodrivstoff (men helst disse to kombinert).

Beregninger i dette prosjektet viser at:

- Hydrogen og brenselceller kan fungere som et fullverdig energieffektivt alternativ for nullutslipp fremdrift av ferger
- Brenselceller er særlig fornuftig for lengre strekninger (hvor ren batteridrift ikke er mulig av hensyn til vekt og ladekapasitet)
- Drivstoff (elektrisk kraft til hydrogenproduksjon) representerer hovedkostnad – nødvendig med god infrastruktur

For å bringe hydrogenteknologi til et kommersielt nivå, og dermed utvikle et fullverdig nullutslippsalternativ til dagens fossilbaserte energisystemer i fartøy, vurderes det som avgjørende å etablere et fullskala demoprojekt¹.

For å nå høyest grad av energieffektivisering og minimum klimautslipp må det tilrettelegges for optimal drift av sambandet. Her synes det hensiktsmessig at oppdragsgiver tilrettelegger nødvendige grensesnitt inkludert:

- Fergekai med bilbro, oppstillingsplass og tilførselsveier.
- Landstrømkapasitet.

Deretter er det viktig at forholdene i en anbudskonkurranse legges til rette for at de beste løsninger blir tilbydd og valgt. Viktige parametere i så måte er krav til produksjon (rutetabell), oppdrags varighet, evalueringskriterier o.l.

Det er som del av studien utviklet et digitalt verktøy som kan brukes av oppdragsgiver til å studere et vilkårlig samband.

¹ Hydrogen anses per i dag ikke som et reelt alternativ for anbudskonkurranser. Det bør først legges til rette for et demonstrasjonsprosjekt på et egnet fergesamband. Teknologien for å gjøre dette er absolutt til stede men en reder kan ikke forventes å ta full risiko for kostnader og myndighets godkjenning på det første prosjektet.

2. INNLEDNING

Dette dokumentet er en oppsummeringsrapport for en potensialstudie som omhandler mulighetene som finnes i industrien generelt innen dagens (og delvis morgendagens) teknologi for energieffektivisering og redusert klimabelastning i norsk fergedrift.

Studien er forsøkt utført mest mulig teknologi- og løsningsnøytral uten bevisste forsøk på å favorisere en løsning fremfor en annen på annet grunnlag enn energieffektivitet og klimavennlighet. Dog er det alltid slik at en har varierende erfaring og kjennskap til ulike teknologi, og en utelukker ikke at resultat kan til en viss grad bli preget av det.

Oppdraget er utført i perioden høst 2014 til høsten 2015 for Statens Vegvesen (SVV) av LMG Marin med assistanse fra Norsk Energi og CMR Prototech som alle er bedrifter knytt opp mot den maritime klyngen MCT CleanTech.

3. MÅLSETNING

Målsetningen med potensialstudiet er som følger:

- 1) Identifisere aktuelle fergekonsept (skrog/maskineriløsninger) og øvrige tiltak for energieffektivisering og redusert klimabelastning basert på teknologi som er eller vil i nær fremtid bli kommersielt tilgjengelig for fergedrift.
- 2) Identifisere energieffektiverende, klima- og miljøvennlig potensial for de ulike konsept og tiltak, for ulike typer fergedrift og fergesamband. Potensial identifisert som faktiske energi/utslipp verdier og med hensyn på kostnadseffektivitet.
- 3) Forfatte rapport og utvikle et digitalt verktøy som oppdragsgiver kan benytte som hjelpemiddel for fastsettelse av energi/klimakrav ved utarbeidelse av fremtidig ferge anbudsdokumentasjon.

Dette dokumentet presenterer arbeidet inkludert anvendt teknologi, metoder og resultater på overordnet og eksemplifisert basis, mens tilhørende digitalt verktøy kan gi spesifikke data for vilkårlig samband. I dette dokumentet gis også en brukerveiledning for det digitale verktøyet (ref. kapittel 7). Rapport og digitalt verktøy bør brukes sammen.

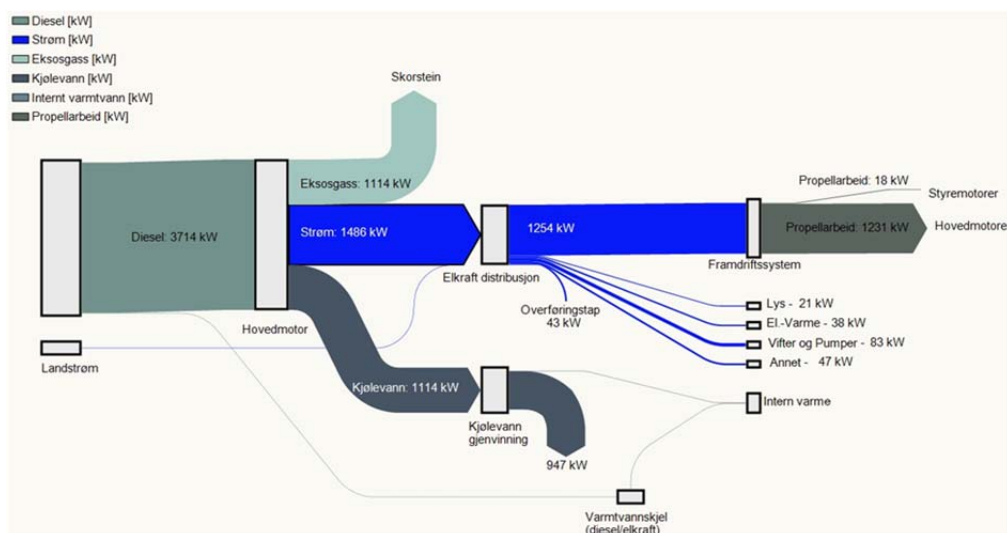
4. ANVENDT TEKNOLOGI

Teknologi som anvendt i dette studiet er presentert i påfølgende underkapitler, innbefattet en generell beskrivelse og dens potensial for energieffektivisering og redusert klima/miljøbelastning i ferge drift. Hensikten er å gi bruker en overordnet forståelse av aktuell teknologi og dens potensial i ferge drift, mens spesifikke resultat presenteres i kapittel 5.

Studien tar for seg alternative energibærere, energilagre, alternative skrogkonsept og alternative maskinerikonsept samt generelle energieffektiviserende og klimavennlige tiltak, og utreder ulike kombinasjoner av disse for relevante typer samband og ferge drift. Prinsippet er som følger:

- Alternative skrogkonsept undersøkes i kombinasjon med alternative maskinerikonsept og energibærere/energilagere.
- Generelle energieffektiviserende og klimavennlige tiltak undersøkes for vilkårlig kombinasjon av skrog, maskinerikonsept og energibærere.

For illustrasjonsformål og introduksjon til problemstillingen er energiflyt i en typisk dieselelektrisk ferge vist i figur 4-1 nedenfor.



Figur 4-1: Energiflyt for typisk ferge i transitt (illustrasjon: Norsk Energi)

4.1 ENERGIKILDER OG ENERGIBÆRERE

Energikilder og energibærere som er mest aktuell for fergedrift er beskrevet i påfølgende underkapitler.²

4.1.1 FOSSILT BRENSEL

Det finnes en rekke ulike fossile brensel som kan tenkes anvendt, men det er kun marin diesel gassolje og LNG naturgass som per i dag anvendes til ferge drift.

Diesel gassolje: Ved forbrenning i en typisk hurtigløpende motor for ferge drift produseres rundt 650 – 700 gCO₂/kWt.³ CO₂ utslipp kommer direkte av karboninnhold i drivstoff men spesifikt

² Utslippsdata i form av CO₂, NO_x og eventuelt CH₄ tilknyttet de ulike energibærere og energikilder hentes fra SVV data som benyttet på fergeanbud med miljøkrav, for ekvivalent CO₂ se vedlegg D.

utslipp avhenger av motors termiske virkningsgrad og driftsmønster og kan variere. Samme hurtigløpende motor (med IMO Tier II sertifikat) vil slippe ut rundt 7 gNO_x/kWt.⁴

Naturgass: Produserer i utgangspunktet rundt 25% mindre CO₂ da det er færre karbonatomer per energienhet i dette drivstoffet sammenlignet med diesel. Typiske verdier for en hurtigløpende «lean burn» gassmotor er 550 gCO₂/kWt. Dog må det kompenseres for utslipp av uforbrent metan. Metan har en klimaeffekt som er rundt 22 ganger verre enn CO₂, og tas høyde for et typisk metanutslipp på 5 gCH₄/kWt ender en gjerne opp på tilsvarende CO₂ utslipp som diesel.⁵ En mellomløpende gassmotor er mer effektiv og gir noe lavere utslipp. Merk også at en i denne studien ikke tar hensyn til eventuelt metanutslipp fra bunkringsoperasjoner. NO_x utslipp fra en gassmotor er svært lavt, typisk rundt 1 gNO_x/kWt.

4.1.2 BIODRIVSTOFF

Biodrivstoff er regnet som miljøvennlige energikilder da de anses som CO₂ nøytrale. Karbon i dette brennstoffet regnes som en del av eksisterende mengden som finnes i naturens kretsløp. CO₂ ekvivalent for et gitt biodrivstoff avhenger av mengde fossilt brennstoff benyttet til produksjon av biodrivstoffet.

Det finnes en rekke alternative biodrivstoff som ulike typer biodiesel, biogass, bioetanol, biometanol med mer, men vi vil kun berøre de to førstnevnte i dette studiet.

Biodiesel: Det finnes en rekke alternative typer biodiesel med varierende CO₂ utslippsnivå avhengig av nødvendig medgått energi til produksjon av drivstoffet. For biodiesel B100 regnes i henhold til vedlegg D et ekvivalent CO₂ utslipp på 165 gCO_{2EKV}/kWt. NO_x utslipp vil være det samme som for konvensjonell diesel. Såkalt førstegenerasjons biodiesel er generelt et mer utfordrende drivstoff for forbrenningsmotorer enn gassolje. De fleste industrielle dieselmotorer aksepterer kun en relativ lav innblanding (typisk 5 – 15%) og ikke ren biodieseldrift. I tillegg krever gjerne slik biodiesel oppvarming og kontinuerlig sirkulasjon i lagertanker (må behandles som «ferskvare»). Såkalt andregenerasjons biodiesel skal kunne utnyttes på en konvensjonell dieselmotor uten spesielle tiltak.

Biogass: Også biogass kan utvinnes av ulike kilder med ulik medgått produksjonsenergi, og denne må renses til egnet kvalitet av komprimert eller nedkjølt flytende drivstoff. For biogass av rensed LNG kvalitet regnes i henhold til vedlegg D et CO₂ utslipp på 55 gCO_{2EKV}/kWt. Dog må det alltid kompenseres for CO₂ ekvivalenter tilsvarende uforbrent metan i aktuell forbrenningsprosess. Biogass i LNG kvalitet medfører ingen tilleggs komplikasjoner som drivstoff sammenlignet med fossil LNG.

4.1.3 ELEKTRISITET FRA NETT

Elektrisitet fra nettet kan benyttes til fergedrift i form av landstrøm når fergen ligger til kai eller i kombinasjon med et energilager som batterier og/eller energibærere som hydrogen.

³ Eksempel: Dieselmotor med gjennomsnittlig forbruk i fergedrift på 210 g/kWt og diesel med CO₂-faktor på 3,21 gram CO₂/gram diesel medfører 673 gCO₂/kWt.

⁴ NO_x utslipp kommer av oksygen og nitrogen fra luften som binder seg i forbrenningsprosessen, spesielt ved kombinert høyt trykk og høy temperatur.

⁵ Eksempel: Gassmotor med gjennomsnittlig forbruk i fergedrift på 200 g/kWt, gass med CO₂-faktor på 2,75 gram CO₂/gram gass og uforbrent metan på 5 gCH₄/kWt medfører 660 gCO_{2EKV}/kWt. 17% av CO_{2EKV} utslippet stammer da fra uforbrent metan.

Det felles nordiske elektrisitetsnettet som en baserer seg på i dette studiet har en miks av energiprodusenter som i henhold til vedlegg D tilsvarer et CO₂ utslipp på 75 gCO₂_{EKV}/kWt.

Elektrisitetsnett i andre geografiske områder kan ha helt andre CO₂ utslipp, og kan i enkelte tilfeller medføre større klimabelastning enn dagens tradisjonelle ferge drift. Men dersom en utnytter elektrisitet fra en dedikert vannkraftkilde eller vindmøllekilde kan en oppnå nær nullutslippsløsning.

4.1.4 HYDROGEN

Hydrogen er en energibærer på lik linje med elektrisitet og grad av miljøbelastning avhenger av energikilde som benyttet til produksjon. For hydrogen produsert ved hjelp av elektrolyse medgår 52 kWt per produsert kg hydrogen. Dersom en anvender elkraft fra nettet til denne produksjonen resulterer dette i et CO₂ utslipp på 117 g CO₂_{EKV}/kWt. Dersom hydrogenet produseres fra dedikert vannkraft eller vindkraftkilde kan en oppnå nær nullutslippsløsning. Se Appendix A : for flere detaljer.

4.2 SKROGKONSEPTER

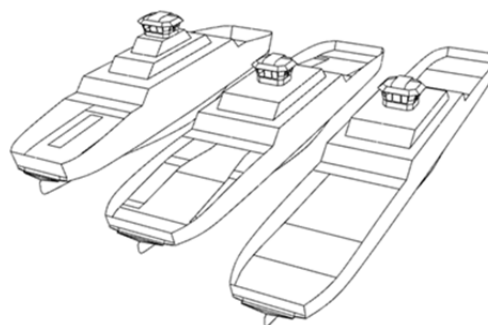
Aktuelle skrogkonsepter som vurderes er enkeltskrog- og katamaran pendelferger bygget i aluminium eller stål som presentert med tilhørende karakteristikk i påfølgende underkapitler.

For fartøyskonseptene som vurderes er arrangert bildekk og passasjersalong basert på det som anses mest hensiktsmessig og typisk for de ulike fergestørrelser. Alternative arrangement er:

- Enkelt bildekk over hele bredden og lengden, og salong over
- Hoved bildekk i full bredde med reposdekk for personbiler på en eller hver side og salong over
- Dobbelt bildekk (nedre lukket og kun for personbiler) og salong over

Prinsippskisse for disse tre alternative arrangementene er vist for enkeltskrog ferge i figur 4-1. Katamaran med enkelt bildekk er vist i figur 4-2.

Arrangement med sidehus salong på hoved bildekk og reposdekk for personbiler som går over salong er også aktuelt men ikke inkludert da en anser et slikt arrangement for i denne sammenheng å gi tilsvarende resultat som de andre. Valgte arrangementer som funksjon av skrogkonsept og ferge størrelse som anvendt i database fremgår av tabell 4-1 nedenfor.

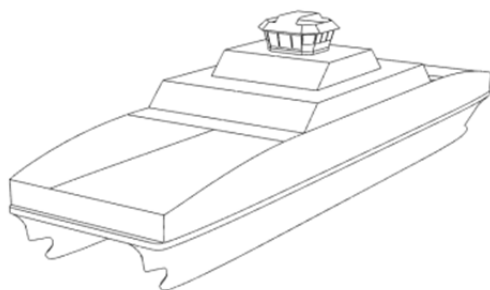


Figur 4-1 Alternative fergearrangement

Skrog	Arrangement	20 PBE	30 PBE	40 PBE	50 PBE	70 PBE	90 PBE	125 PBE	165 PBE	212 PBE	290 PBE
Enkelskrog	Enkelt bildekk	x	x	x	x	x	x				
Enkelskrog	Bildekk med reposdekk							x			
Enkelskrog	Dobbelt bildekk								x	x	x
Katamaran	Enkelt bildekk	x	x	x	x	x	x				
Katamaran	Bildekk med reposdekk							x	x	x	x

Tabell 4-1: Anvendt arrangement som funksjon av ferge størrelse

Alle vurderte konsept er begrenset til pendelferger med åpne bildekk (og evt. lukket nedre dekk) i størrelse 20 til 290 biler da det er vurdert slik at studiens konklusjoner og trender ikke vil endres



av om en inkluderer flere alternativer.

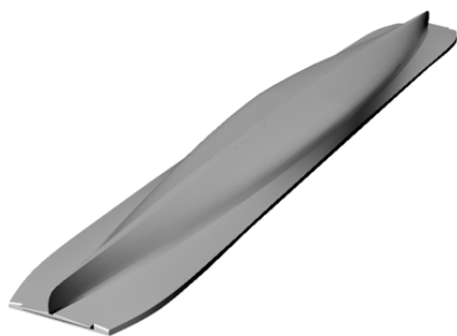
Figur 4-2: Katamaran arrangert med enkelt bildekk

Ulike kombinasjoner av skrogkonsept og skrogmaterial er presentert i påfølgende underkapitler.

4.2.1 ENKELTSKROG I STÅL

Tradisjonell enkeltskrog pendelferge bygget i stål kan anses som referansekonsept da de aller fleste ferger er bygget etter dette prinsipp.

For dette studiet har en tatt utgangspunkt i hydrodynamisk optimalisert skrogform tilpasset propulsjonsløsning med en propulsjonsenhet av type rorpropell (asimut thruster) i hver ende, slingrekjøler på hver side som strekker seg rundt 40% av lengden og ingen markant kjøll eller styrefinne.⁶ Typisk skrogform er vist i figur 4-3.



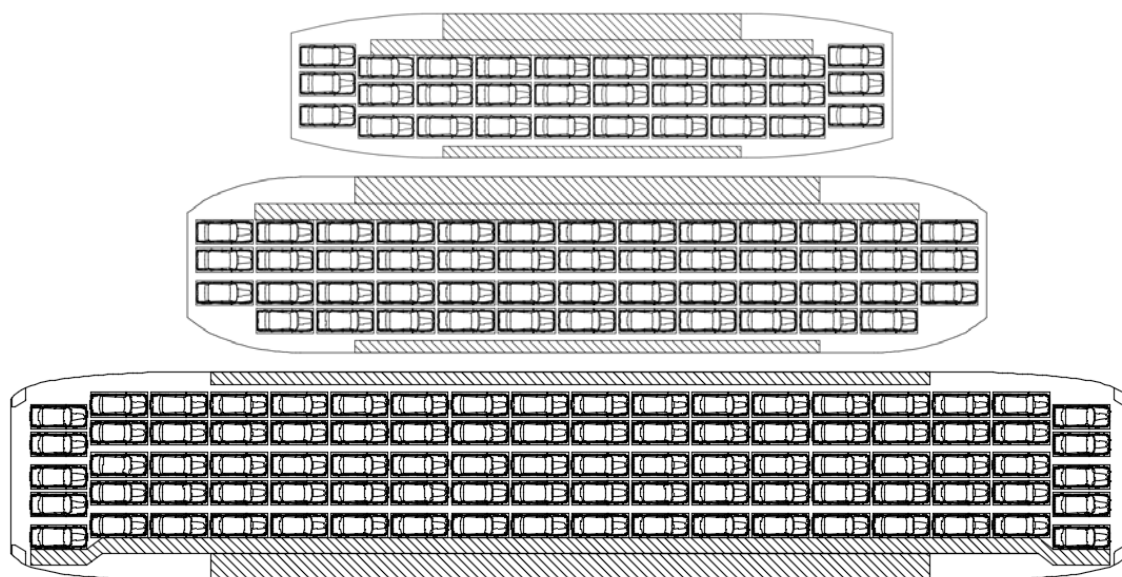
Skrog har midtspant utforming med flat kjøll/bunn på en ca. ½ meters bredde, svak V-formet bunnreis, avrundet kiming og svakt utad skrående skipssider. Vannlinje karakteriseres av spiss V-form mot baugene som strekker seg noe lenger frem enn bilbrohyll.⁷

Figur 4-3: Typisk enkeltskrog bygget i stål

Skrogets lengde/bredde forhold bestemmes med utgangspunkt i et fornuftig bildeksarrangement. Det ønskes av hydrodynamiske forhold et stort lengde/bredde forhold, noe som for ferger større enn rundt 50 PBE er forenlig med et fornuftig bildeksarrangement, mens en for mindre ferger ender opp med et ikke optimalt lengde/bredde forhold samt lavere arealutnyttelse. Det betyr at de mindre enkeltskrog fergene har dårligere energieffektivitet enn de store, se figur 4-4 nedenfor (skraverter områder er arealkrav til struktur og passasje).

⁶ Antall propulsjonsenheter begrenses til to per fartøy med mindre krav til høy hastighet og tilhørende store effekter krever fire.

⁷ Bulbformet baug benyttes i stedet for spiss V-form for høyere Froude nummer (dvs. høy hastighet relativt til skipets lengde).



Figur 4-4: Typisk bildekkplan for 30, 50 og 90 PBE ferger (L/B = 4,2 – 4,6 – 5,4)

Fartøyskonseptet (enkeltskrog i stål) er normalt et fornuftig kompromiss mellom ytelser og kostnader.

4.2.2 ENKELTSKROG I ALUMINIUM

En ferge er et relativt enkelt utrustet skipskonsept hvor skrog utgjør en relativt stor andel av totalvekt (lettskip). Ved bruk av aluminium oppnås betydelig vektreduksjon sammenlignet med stål⁸. Redusert vekt gir grunnlag for å oppnå redusert skrogmotstand, og redusert energiforbruk til akselerasjon og retardasjon av fergen (analogt med $\text{kraft} = \text{masse} \times \text{akselerasjon}$).

En enkeltskrog pendelferge i aluminium vil på grunn av krav til stabilitet og arrangement kreve tilsvarende bredde som en stålferry, noe som gjør at redusert oppdriftsvolum oppnås med redusert dypgang. Skroget får dermed svakere bunnreis enn stålalternativet og det oppnås ikke like stor reduksjon av neddykket overflate som vektreduksjon skulle tilsi (fartøys friksjonsmotstand er proporsjonal med dets «våte overflate»). Ellers vil et enkeltskrog i aluminium følge samme prinsipper beskrevet for stålalternativet i forrige kapittel (kapittel 4.2.1).

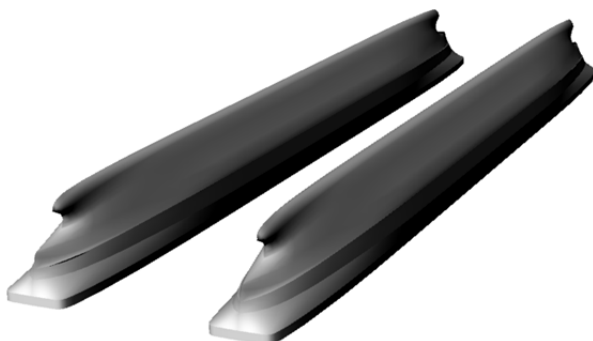
Skrogmotstand for aluminium er lavere enn stålalternativet men ikke proporsjonalt med vektreduksjonen. Redusert vekt gir også reduksjon i energimengden som skal til for å akselerere og retardere fergen, som utnyttes til redusert tidsforbruk i akselerasjon- og retardsjonsfasen med tilhørende redusert transitthastighet.

4.2.3 KATAMARAN I STÅL

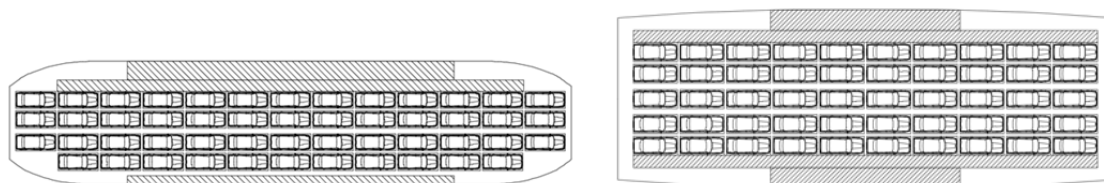
Et katamaran pendelferge konsept utformes med slanke sideskrog som har tilstrekkelig innbyrdes avstand til å minimere interaksjoner dem imellom. En katamaran i stål har normalt relativt dype skrog for å oppnå tilstrekkelig oppdrift. Ett eller begge sideskrogene utformes med et løftet område i baugene for integrasjon av rorpropellere uten at de stikker for dypt. Typisk katamaran skrogform er vist i figur 4-5.

⁸ Aluminium skrogvekt er typisk 40 – 45% av et stålskrog om en legger DNV LC (Light Craft) regelverk til grunn for dimensjoneringen.

En katamaran har et betydelig lavere lengde/bredde forhold enn en enkeltskrogsløsning men gunstig utformede sideskrog. Det oppnås med dette et gunstig bildeksarrangement og den økte bredden på baugene kan utnyttes til økt bilbrobredde og derav redusert laste/lossetid dersom forholdene ellers tillater dette (ikke utredet som del av denne studien). Figur 4-6 nedenfor sammenligner bildeksarrangement for 50 PBE ferge basert på enkeltskrog og katamaran konsept.



Figur 4-5: Katamaran skrogform



Figur 4-6: Typisk bildeksplan, katamaran og enkeltskrog 50 PBE ferge

Da høyde fra vannlinje til dekkshjørne ikke bør overstige 2,8 meter i lett kondisjon vil høyde til katamarans tunelltopp være begrenset slik at konseptet gjerne ikke vil være egnet for spesielt værutsatte samband.⁹

En katamaran oppnår tilstrekkelig rulledemping og retningsstabilitet uten slingrekjøler, kjøler eller styrefinner. Tilleggsmodstand som dette representeres kan dermed unngås.

En katamaran har større neddykket overflate (typisk +25%) og en høyere lettskipvekt (typisk +10%) sammenlignet med et enkeltskrogskonsept av samme byggemateriale og kapasitet. Slanke sideskrog gir lav bølgemotstand men kompenserer ikke for økt friksjonsmotstand som følge av våt overflate i aktuelle hastigheter for fergedrift. Et katamaranskrog har derfor høyere motstand enn enkeltskrog innenfor størrelse og fart som vurderes i dette studiet.

4.2.4 KATAMARAN I ALUMINIUM

Et katamaran aluminiumskonsept vil følge samme prinsipp som nevnt over for katamaran stålversjon, men en vil i dette tilfellet oppnå redusert dyppgang på sideskrogene med relativt sett større reduksjon i våt overflate enn hva tilfellet er mellom stål/aluminium enkeltskrog alternativet.

En katamaran i aluminium kan beviselig danne grunnlag for et energieffektivt fergekonsept dersom man kombinerer det med effektiv propulsjon og generelle energieffektiviserende tiltak som diskutert i kapittel 4.4.

⁹ 2,8 m er makshøyde for å passe med dagens bilbro standard, og lav tunnelhøyde gir mulighet for store hydrodynamiske belastninger og slag i grov sjø.

4.3 MASKINERI FREMDRIFTSLØSNINGER, ENERGILAGRING OG ENERGIBÆRERE

I påfølgende underkapitler er det gitt en generell utredning av de ulike maskineri-, energilagring- og energibærer konsept som er vurdert i dette studiet.

4.3.1 DIESELMEKANISK FREMDRIFT

Et typisk dieselmekanisk fremdriftssystem for pendelferge består av en hurtigløpende dieselmotor i hver ende som er koplet til hver sin rorpropell via kløtsj. Rorpropell har innebygget reduksjonsgir og normalt propell med fast stigning.¹⁰

For elektrisk kraftproduksjon til hjelpesystemer og hotell¹¹ er det arrangert to stykk små hurtigløpende diesel generatorsett. Disse besørger elektrisk kraft i normal operasjon (en i operasjon og en standby) mens en over natten benytter landstrøm via manuell tilkopling (kabel) med kapasitet typisk begrenset til 2 x 125A (3-fase, 230V, 50 Hz – tilsvarer rundt 80 kW).

Normalt utnyttes restvarme fra hovedmotorenes kjølevann til oppvarming av fergen (varmeveksling mot ventilasjonsanlegg) i kombinasjon med elektrisk oppvarming. I tillegg er det normalt arrangert dieselfyrt kjel som besørger oppvarming når restvarme ikke er tilgjengelig og/eller elkraft er begrenset (typisk ved landligge over natten).

Beskrevne konsept er den mest tradisjonelle løsningen for pendelferger og anses som referanse for sammenligning mot alternativer i denne studien.

Et dieselmekanisk anlegg produserer utslipp av NO_x, CO₂ og SO_x. SO_x utslipp er proporsjonalt med svovelinhold i drivstoffet og begrenses til moderate mengder ved bruk av lavsvovel gassolje¹². Noe NO_x reduksjon oppnås ved bruk at motorer sertifisert i henhold til IMO Tier II krav, men dette er motorinnstillinger som reduserer NO_x på bekostning av CO₂. NO_x kan ytterligere reduseres ved bruk av katalysator (som forbruker urea), men et slikt anlegg har begrenset effektivitet i dieselmekanisk drift kjennetegnet med stor variasjon i eksostemperatur og relativt lange perioder med lav eksostemperatur (katalysatoranlegg bør ha høy og jevn eksostemperatur for å yte best). CO₂ utslipp kan reduseres ved bruk av biodiesel (se kapittel 4.1.2).

4.3.2 GASSELEKTRISK FREMDRIFT

De fleste gassfergene er arrangert med gasselektrisk fremdrift hvor hurtigløpende eller mellomløpende gassmotor generatorsett leverer all kraftproduksjon om bord inkludert propulsjon, hjelpesystemer og hotell. Hovedårsaken til at denne løsningen foretrekkes fremfor gassmekanisk alternativ er manglende utvalg av gassmotorer i aktuell effektstørrelse som tillater direkte mekanisk drift med variabelt turtall.

Til fremdrift benyttes normalt frekvensstyrte elektromotorer¹³, typisk en i hver ende som driver rorpropellere med fast stigning etter variabelt turtall.

¹⁰ For større ferger kan det være aktuelt med mellomløpende dieselmotorer (med noe høyere effektivitet) samt rorpropell med variable stigning (det er større utvalg av rorpropellere for høyere effekter).

¹¹ Helpesystem og hotell innbefatter energi som medgår til maskineri hjelpesystemer og mannskap/passasjer innredning, altså alt energibehov om bord i fergen med fratrekk av propulsjon.

¹² <500 ppm som normalt er absoluttkrav for fergedrift

¹³ Induksjon asynkron motor

Et elektrisk fremdriftsanlegg har typisk lavere effektivitet i fergedrift enn en direkte mekanisk løsning på grunn av energitap ved omforming til/fra mekanisk/elektrisk energi. Energitap erfares gjennom generator, tavle/kabler, trafo, «drive» og motor, og dette resulterer for fergedrift gjerne i et gjennomsnittlig elektrisk tap i størrelsesorden 13%. Gunstig driftspunkt for gassmotorene og derav lavere spesifikt forbruk kompenseres normalt ikke fullt ut for et slikt tap (gjelder ikke nødvendigvis hybridferge hvor elektrisk fremdrift støttes av batteripakke).

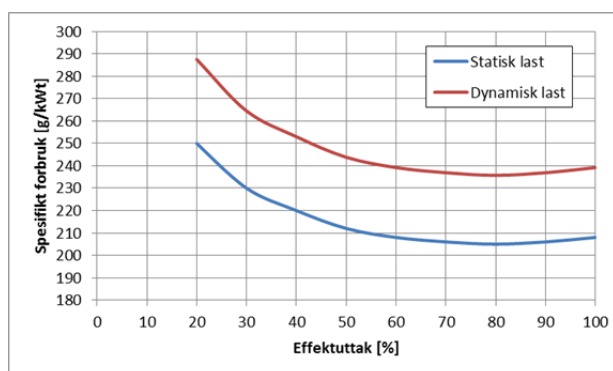
Som for dieselmekanisk løsning benyttes landstrøm over natten, og det utnyttes på samme måte kjølevann restvarme i operasjon samt dieselfyrt kjel som redundant varmekilde (dieselfyrt kjel er installert på de aller fleste gassfergene).

Gassdrift gir betydelig reduksjon i NO_x utslipp sammenlignet med dieseldrift (typisk 80%), og gir null SO_x utslipp. Se ellers kapittel 4.1.1.

En gassferge er typisk 10 til 20% dyrere i innkjøp men brennstoffet fås gjerne til rundt samme pris per energienhet som diesel¹⁴.

4.3.3 DIESEL/BATTERI HYBRIDFREMDRIFT

Den enkleste form for diesel/batteri hybridløsning er hvor et diesel generatorsett produserer all energi og leverer denne på konstant turtall og med konstant last til en batteripakke som igjen leverer til propulsjon, hjelpesystemer og hotell. Gevinsten med et slikt konsept er i denne sammenheng først og fremst energieffektivisering. Generatorsettet får i denne installasjonen operere på optimalt driftspunkt og under ideelle forhold uten dynamiske lastendringer som ellers ville gitt økt brennstoff forbruk. For fergedrift erfares slike dynamiske lastendringer først og fremst under akselerasjon, retardasjon og manøvrering, og med denne hybridløsningen håndterer batteriet lastendringene uten at generatorsettet er påvirket. Se figur 4-7 som illustrerer hvordan motors spesifikke forbruk antas variere fra statisk til dynamisk operasjon.



Figur 4-7: Illustrasjon, spesifikt brennstoffforbruk for typisk dieselmotor ved statisk og dynamisk belastning

Dog skal det nevnes at elektrisk fremdrift normalt medfører et tap sammenlignet med mekanisk fremdrift som må tas høyde for før en konkluderer oppnådd energieffektivisering. Effektivitet på det elektriske fremdriftsanlegget avhenger av valgt teknologi, om det er vekselstrøm med frekvensomforming, likestrømanlegg, permanentmagnetmotorer eller annet. Hoved fokus ved valg av anlegg bør være jevnt høy virkningsgrad over hele last- og turtallsintervallet som anvendes. For et tenkt hybrid nybygg kan effektiv systemløsning tilpasset batteridrift benyttes,

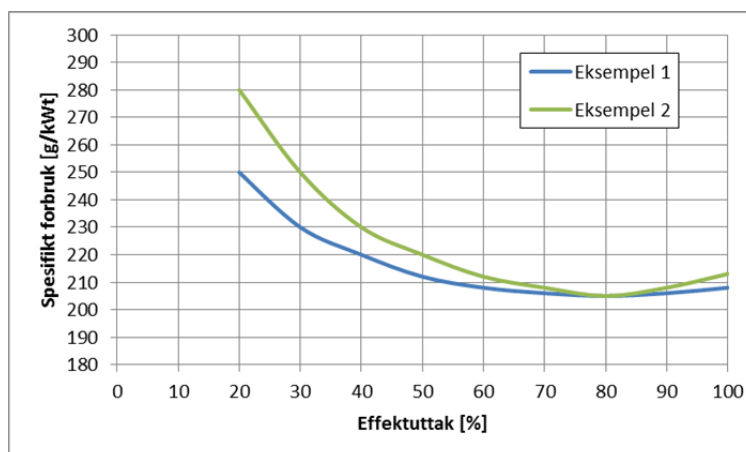
¹⁴ I Norge er pris på LNG påvirket av få leverandører og relativt dyr småskala logistikk som kombinert gjør at et brennstoff som i utgangspunktet er rimelig ofte ender opp tilsvarende som marin gassolje (diesel).

mens en for hybrid ombygginger/oppgradering av eksisterende ferger er nødt til å tilpasse eksisterende anlegg.

I denne enkleste form for hybridløsning kan det anvendes et batteri med relativ lav kapasitet. Det er ikke påkrevd opplagring av store mengder energi, kun for å håndtere toppbelastninger som overstiger gjennomsnittsbelastningen generatorsettet leverer. Eneste form for landstrøm som anvendes er ved kailigge over natten tilsvarende en konvensjonell dieselmekanisk løsning. Et slikt konsept vil typisk også benytte dieselfyrt kjel til oppvarmingsformål over natten, når restvarme fra kjølevann ikke er tilgjengelig (og landstrømkapasitet ikke er tilstrekkelig).

En annen form for diesel/batteri hybridløsning er en plugg-inn variant hvor en delvis baserer seg på energi hentet fra el-nettet til normal drift. Her vil en utnytte tid ved kai til å lade opp batteriene, og kompensere for resterende energibehov med et generatorsett om bord. For at et slikt anlegg skal få en betydelig andel av sin energi tilført fra nettet bør en justere rutetabell slik at det oppnås økt tid til kai. Et spesielt landstrøm ladesystem med høy overføringskapasitet og hurtig oppkopling ala en ren batteriferge er nødvendig for en slik løsning.

For den enkleste form for hybridløsning oppnås som nevnt energieffektivisering, og ingen annen form for CO₂ utslippsreduksjon¹⁵. Slik energieffektivisering har vist seg betydelig på eldre ferger konvertert til hybrid, men er avhengig av hvor følsom valgt dieselmotor er til dynamisk lastvariasjon og hvordan forbruk rammes utenfor optimalt driftspunkt, se figur 4-8.



Figur 4.8: Illustrasjon hvordan spesifikt forbruk kan variere som funksjon av last for ulike motorer

For et generatorsett i hybridløsning som går med konstant turtall og konstant last vil en installert eksoskatalysator være effektiv for NO_x reduksjon (mer effektiv enn for dieselmekanisk løsning). Videre ligger forholdene til rette for å installere eksoskjel eller annen form for eksosvarmeutnyttelse i tillegg til uttak av restvarme fra kjølevann dersom det finnes et oppvarmingsbehov som kan dekkes.

For en plugg-inn hybridløsning vil en oppnå CO₂ reduksjoner proporsjonalt med andel av energi hentet fra el-nett. Bruk av biodiesel er selvsagt mulig for ytterligere CO₂ reduksjon.

Sammenlignet med dieselmekanisk løsning er det den elektriske fremdriften med batteripakken som medfører ekstra investeringskostnader. Spesielt batteripakken har en høy kostnad per kWh, noe som gjør en plugg-inn hybridløsning med tilhørende relativt store batterier høyt priset. For

¹⁵ Utslipp av NO_x og sot vil også reduseres ved bortfall av dynamisk lastvariasjon (vanskelig å kvantifisere).

plugg-inn varianten kommer også tilleggs kostnader knytt til høykapasitet hurtiglading samt nett-oppradering eller bufferbatterier på land.

Den enkleste form for hybridløsning er mulig og viser seg ofte effektiv for oppgradering av eksisterende ferger som allerede har elektrisk fremdrift.

4.3.4 GASS/BATTERI HYBRIDFREMDRIFT

En gass/batteri hybridløsning er i prinsipp identisk med diesel/batteri hybrid som beskrevet ovenfor, men en hybrid basert på gass slipper i utgangspunktet ut mindre NO_x.

Med et gassdrevet generatorsett som går på konstant turtall og last er det gjerne enda høyere energieffektiviseringspotensial enn for diesel, da noen gassmotorer er mer følsom for lastvariasjon enn en dieselmotor. Dermed vil en kunne oppnå høyere energieffektiviseringseffekt, og gjerne også bedre kontroll med utslipp av uforbrent metan.

En gassmotor har også høyere eksostemperatur og derav bedre egnet for eksoskjelinstallasjon benyttet til oppvarmingsformål, eller løsninger som produserer elkraft fra eksosvarme.

Biogass produserer færre CO₂ ekvivalenter enn biodiesel (selv om uforbrent metan tas hensyn til).

Et gassgeneratorsett med nødvendige sikkerhetssystemer medfører ekstra investeringskostnader sammenlignet med diesel generatorsett, på samme måte som tilfellet er for rene gassferger.

4.3.5 HYDROGENDRIFT

Brenselceller, som batterier, fungerer ved at de konverterer lagret kjemisk energi til elektrisk energi som eksempelvis kan brukes til kraftforsyning for elektromotorer og hotellkraft om bord i en ferge. De fleste brenselcelleteknologier benytter hydrogen som drivstoff. Elektrisk kraft produseres ved at hydrogen og oksygen fra luft kombineres til vann og energi ($H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O + \text{elektrisitet} + \text{varme}$). Hydrogendrevne brenselceller representerer dermed en framdriftsteknologi uten direkte utslipp av klimagasser eller partikler (eneste utslipp er rent vann). Dersom hydrogenet er produsert ved elektrolyse (splitte vann i hydrogen og oksygen) og ved å bruke elektrisitet fra fornybare kraftkilder, vil hydrogendrevne brenselceller representere en (tilnærmet) nullutslippsløsning for fremdrift av ferger.

I tillegg til hydrogen kan andre drivstoff som naturgass, (bio)metanol og (bio)etanol benyttes. Brenselceller kan også kombineres med batterier i en hybridferge.

Se utredning fra CMR Prototech i vedlegg A.

4.3.6 BATTERIFERGE

En ren batteriferge tar all sin energi fra el-nettet, og batteripakken om bord har til oppgave å lagre nok energi for operasjon til neste opplading. Batteriene om bord kan eksemplevis dimensjoneres for syklus per overfart eller for syklus per dag. For dimensjoneringssyklus per overfart kan det oppnås en moderat batteristørrelse, men da er en også helt avhengig av å få nok tid ved kai til full opplading. Det betyr at fergen må ligge til kai noe lengre enn den ellers ville ha gjort. For alternativet med syklus per dag blir batteriene mye større, men for denne løsningen tar en kun den lading en får ved kai uten å nødvendigvis kreve lengre liggetid enn normalt (dette alternativet er ikke inkludert i dette studiet).

Krav til landstrøm er betydelig for en batteriferge og langt utover normal landstrømkapasitet som er tilgjengelig per i dag på fergekaiene. Kapasitet kan utbygges enten direkte fra nærliggende høyspenningsnett eller via bufferbatterier som står på land. For en bufferbatteri løsning kan en også utnytte parallell opplading fra batteri og el-nett for å maksimere overføringskapasitet. Utfordringen med en batteribuffer løsning er at den normalt kun kan håndtere en ferge (trenger oppladningstid), og om en ser for seg et samband med flere batteriferges må en sikre at batteri på land får tilstrekkelig lading fra dene ene fergen går til den andre ankommer. Med direkte lading uten bufferbatterier på land må en sikre seg at nettet kan håndtere de brå lastvariasjonene, hvis ikke må bufferbatterier brukes for å jevne ut lasttoppene.

Det er viktig å merke seg at en batteriferge ikke er egnet til alle samband. Det ligger en begrensning i hvor store batterier en kan forsvare rent økonomisk å investere i, og det finnes begrensninger i hvor stor ladestrøm en klarer å få til i praksis. En batteriferge bør derfor være optimalisert for lavest mulig energiforbruk som typisk kan oppnås med kombinasjon av lav fart, lav vekt (dvs. aluminiumkonstruksjon) og et minimum av energiforbruk til hjelpesystemer og hotell. Spesielt lav fart er virkningsfullt for å få ned energiforbruk.

Batteriferges anses egnet for samband hvor overfartslengde er begrenset og hvor relativt lav fart kan aksepteres (helst 10 knop eller lavere). Utover det bør det heller vurderes plugg-inn hybridløsning som maksimerer bruk av landstrøm innenfor praktiske begrensninger.

En ren batteriferge vil gi et CO₂ utslipp tilsvarende el-nettet på 75 gCO_{2EKV}/kWt, men en kan også se for seg en nullutslippsløsning dersom en kan utnytte et lokalt vann/vind minikraftverk eller tilsvarende.

En energieffektiv batteriferge med unntak av batteriene og ladesystemene på/mot land kan anskaffes til relativt lav pris. Det er få systemer om bord som betyr lave systemkostander. Dersom skrog bygges i aluminium medfører dette en ekstrapris sammenlignet med stål. Batterier installert om bord, høykapasitet hurtigladesystem og bufferbatterier (eller el-nett høykapasitet oppgradering) på kaiene medfører en betydelig kostand. Dog forventes en positiv utvikling på kostnadssiden etter hvert som nye anvendelser kommer og etter hvert som konkurransen øker på leverandørsiden.

4.4 GENERELLE ENERGIEFFEKTIVISERENDE OG KLIMAVERNENLIGE TILTAK

Med generelle tiltak menes energieffektiviserende og/eller klima/miljøvennlige tiltak som per i dag ikke er «standardløsning» for ferger og som kan tenkes implementert på et vilkårlig type fergekonsept. Slike tiltak er presentert nedenfor med inndeling i følgende hovedkategorier:

Spart tidsbruk ved kai: Tiltak som gir indirekte energieffektivisering i form av redusert transittthastighet som muliggjøres til uendret avgangsfrekvens. Spart laste/lossetid brukes heller som økt tid tilgjengelig til å krysse fjorden. Tiltakene er ikke relevant for batteridrift eller plugg-inn hybridløsninger da lading av batterier uansett krever lengre tid enn laste/losseprosess.

Redusert fremdriftseffekt: Tiltak som gir direkte energieffektivisering i form av lavere energiforbruk til å holde samme hastighet, eller effektivisering av propulsor bruk i andre faser av fergedriften (manøvrering, akselerasjon, retardasjon eller ved kai).

Redusert energiforbruk til hjelpesystemer & hotell: Tiltak som gir energieffektivisering på forbrukere som går konstant uavhengig av om fergen krysser fjorden eller ligger til kai.

Redusert miljøbelastning: Dette er tiltak som gir redusert miljøbelastning uten energieffektivisering, for eksempel eksosrenseanlegg.

Identifiserte tiltak med potensial innen disse kategoriene presenteres i påfølgende underkapitler.

4.4.1 TILTAK FOR SPART TIDSBRUK VED KAI

I dette studiet er det antatt ideelle forhold for lasting og lossing av fergen ut i fra fergens størrelse, antall bilrekker på dekk og bredde på baugrampe (ref. tiltakene beskrevet nedenfor). Dersom dette ikke er tilfellet må bruker selv ta høyde for restriksjon (angis som % reduksjon i om bord/ilandkjøringshastighet for kjøretøy i studiens tilhørende digitale verktøy).

Samtidig må det bemerkes at alle former for operasjoner som medfører økt tidsforbruk ved kai utover det nødvendige medfører økt energiforbruk, inkludert eksempelvis:

- Billettering på land etter at biler har kjørt på land eller mens bilene kjører om bord.
- Venting på kjøretøy som kommer senere enn rutetabellens avgangstid.
- Venting til rutetabellens avgangstid på grunn av at en ankom for tidlig (for høy fart).
- Manglende bruk av samtidig iland- og ombordkjøring.
- Tett og tidkrevende stuing ved køer som overgår fergens kapasitet.

Samtlige av disse eksemplene kan tas høyde for i nevnte digitalt verktøy som beskrevet ovenfor.

Følgende tiltak for redusert tidsbruk ved kai er identifisert.

Kjøretøy oppstillingsplass: Optimalt arrangement tillater ombordkjøring samtidig som biler kjører i land og tillater i tillegg parallell ombordkjøring av flere rekker samtidig dersom ombordkjøringsrampe har tilstrekkelig bredde. Oppstillingsplass må da være posisjonert slik at avkjørende biler ikke krysser ombordkjøringstrase. Videre må området være oversiktlig, nær ferge og uten obstruksjoner som hindrer god flyt i trafikken.

Veitrasé ut fra fergekai: Optimal løsning tillater at full ferge kan tømmes 100% uten at det oppstår kødannelse som forsinker ilandkjøring. Dersom kjørebredde tillater ilandkjøring av flere rekker samtidig forutsettes tilstrekkelig lengde av tilsvarende antall kjørefelt på land til at fergen tømmes 100% uten kødannelse.

Bredde på bilbro: Optimal bredde dedikert for kjøretøy på bilbro er tilsvarende som fergens bredde på bildekk i endene, men forutsetter også at senterlinjeavstand er lik fergens halvbredde (eventuelt må fergebro ha større bredde for å kompensere for dette). I dette studiet er det dog tatt hensyn til noe plassbehov for utstyr langs skipssider, slik at baugrampe er noe smalere enn bildekksbredde.

Trafikkovervåking: Med «on-line» trafikkovervåking vil en være i stand til å forutsi rimelig nøyaktig hvor mange kjøretøy som skal med på neste tur, og på den måten kunne avpasse fart slik at det akkurat er nok tid tilgjengelig til lasting/lossing før neste avgang.

Dybde: I en del tilfeller er dybde ved kai og begrenset fri avstand til tverrbjelker under bilbro en begrensning for hydrodynamisk optimalisering av skrog og propulsjonssystem. Dersom en legger til

rette for at disse ikke blir praktiske hindringer kan det tilbys mer energieffektive løsninger enn hva som i en del tilfeller nå er mulig.

4.4.2 TILTAK FOR REDUSERT FREMDRIFTSEFFEKT

Tiltak som kan gi direkte redusert fremdriftseffekt er presentert i dette kapittelet.

Også med hensyn på propulsjonseffektivitet skal en være oppmerksom på å unngå løsninger som gir omvendt virkning, eksempelvis:

- Ugunstig plassering av propulsor (for nær skeg eller for nær vannflate)
- Ineffektive propulsorer for fremdrift (eksempel dysepropell og/eller vribar propell som opererer på fast turtall og varierer stigning for lastvariasjon)
- Manglende hydrodynamisk optimalisering av skrogform
- Uttak av propell basert på mangelfullt grunnlag spesifikt for fergen (manglende modelltester)
- Transmisjonsløsninger med store mekaniske tap eller viskøse tap (turbokoplinger)
- Ineffektive fremdriftsmotorer

Slike «negative» tiltak er ikke videre behandlet i denne studien.

Automatisk fortøyning: En slik løsning eller annen form for semi-automatisk eller manuell hurtig låsing av fergen til kai medfører at en ikke trenger å benytte propulsor til å holde fergen inn mot fergebro gjennom kailiggeperioden. Propulsjon kan dermed koples ut mens fergen ligger til kai og tilhørende energiforbruk spares. Effekt av dette tiltaket presenteres senere.

Dekkslastkapasitet: Dersom det påkreves i anbud nødvendig høy dekkslastkapasitet (vogntogkapasitet) gir dette redusert frihet til å forme skrog hydrodynamisk optimalt, men må heller forme det for tilfredsstillende stabilitet. Dette vil igjen gi høyere skrogmotstand og dermed høyere effektforbruk for å holde samme fart. Små ferger er mest følsom for krav til høy dekkslastkapasitet. Skrogkonsept benyttet som grunnlag for denne studien tar høyde for en normal vogntogkapasitet i henhold til de fleste senere anbudskrav gitt av SVV.¹⁶ Økt vogntogkapasitet utover dette er ikke videre belyst i studien.

Ferge lengde/breddeforhold: En ferge designes ofte med utgangspunkt i et praktisk bildekkarrangement. For små ferger medfører dette relativt breie og korte ferger som er ugunstig med hensyn til skrogmotstand. Alternativet er en lengre ferge med færre biler i bredden, men en slik løsning vil normalt gi betydelig høyere anskaffelseskostnad. I denne studien har en basert seg på skrogkonsept med slik ugunstig utforming for mindre ferger, og en har ikke utdypet fordel av mer gunstig og alternativ utforming. Se tabell 4-2 hvor denne effekten er illustrert for ulike fergestørrelser i 12 knops fart.

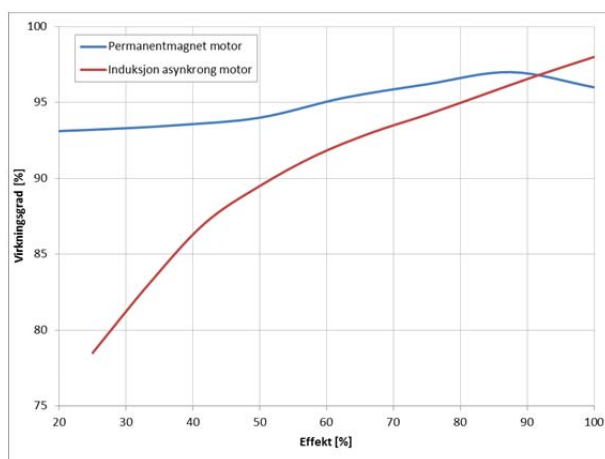
Ferge størrelse	Fremdrifts-effekt	Effektforbruk per PBE
20 PBE	504 kW	25 kW/PBE
30 PBE	510 kW	17 kW/PBE
40 PBE	584 kW	15 kW/PBE
50 PBE	602 kW	12 kW/PBE
70 PBE	684 kW	10 kW/PBE

Tabell 4-2: Effektforbruk i 12 knop for ulike fergestørrelser

¹⁶ Krav er normalt ett vogntog med maksimallast 52,5 tonn og resterende på 25 tonn.

Kjøøl: Det har spesielt for eldre ferger tradisjonelt vært utformet kjøøl og styrefinner på ferger for å gjøre slippsetting enklere og eventuelt for å gi bedre retningsstabilitet. Slike løsninger gir økt motstand og styrefinner kan ofte erstattes av rorpropeller som har tilsvarende effektivt rorareal. Det eneste kan være små ferger som er relativt korte og butte hvor økt retningsstabilitet kan vise seg nødvendig og i sum gi beste løsning med hensyn på energieffektivitet. I dette studiet er det antatt at fergene ikke har kjøøl eller styrefinner.

Permanentmagnet elektromotorer: Tradisjonelle elektromotorer med frekvensstyring har en virkningsgrad på optimal ytelse nær fullast som ligger rundt 98%. Dog faller denne virkningsgraden markant med reduksjon av last og turtall etter en propellerkurve. Gjennomsnittlig virkningsgrad for en typisk fergedrift vil derfor ligge rundt 90% for et slikt system. Elektromotorer basert på permanentmagnet (PM) teknologi er bedre egnet til denne type operasjon og kan oppnå en gjennomsnittlig virkningsgrad i størrelsesorden 95%. Se figur 4-9 som illustrer dette. PM motorer er en dyrere teknologi enn tradisjonelle løsninger. Kan være spesielt egnet til batterihibrid og rene batteriferge.



Figur 4-9: Virkningsgrad for PM og konvensjonell induksjon asynkron motor etter propellkurve (Kilde: NES)

4.4.3 TILTAK FOR REDUSERT ENERGIFORBRUK TIL HJELPESYSTEM & HOTELL

I dette kapittelet presenteres tiltak som kan gi redusert energiforbruk til hjelpesystemer og hotell om bord i fergen. Med hjelpesystemer menes de skipssystemer som er nødvendig for å holde fergens maskineri gående, mens en med hotell mener drift av passasjer- og mannskaps innredning.

Landstrømkapasitet: Landstrømkapasitet er ofte marginal på fergekaier. Dette kan medføre at mannskap av bekvemmelighetshensyn heller foretrekker å ligge med dieseldrevet havneaggregat over natten og andre lengre liggeperioder. På grunn av manglende landstrømkapasitet er det også vanlig å ha løsning med dieselfyrt kjel for å dekke oppvarmingsbehov. Dersom en sikrer tilstrekkelig landstrømkapasitet vil alt energibehov til fergen dekkes av el-nett når den ligger til kai¹⁷. Økt landstrømkapasitet vil kunne slå ut som redusert CO₂ utslipp ved å erstatte dieselfyrt kjel med elektrisk oppvarming.

Landstrømsoppkopling: Landstrøm koples normalt opp med manuelle plugger og løse kabler på opp mot 50 meters lengde til uttak på land som ikke nødvendigvis ligger helt inntil fergen. Dette er medvirkende til at en ikke kopler seg opp til landstrøm ved lengre kailigge i løpet av dagen (1/2

¹⁷ Normalt er det lagt opp til maksimalt 2 x 125A/230V 3-fase landstrøm (rundt 80 kW) og i tillegg dieselfyrt kjel til oppvarming (gjelder ikke batteriferge eller plugg-inn hybrid).

– 1 times varighet). Dersom dette tilrettelegges på en bedre måte kan landstrøm utnyttes selv på relativt korte kaiopphold. I studien er det tatt høyde for at landstrøm anvendes ved kaiopphold over 30 minutter. Effekt av oppkopling tidligere enn dette er ikke undersøkt.

Energigjenvinning og konservering: Det finnes mulighet for energigjenvinning i form av restvarme fra forbrenningsmotorer og bruke dette til oppvarmingsformål om bord i fergen. I Norge er det få dager i året en ikke har behov for oppvarming. Standard løsning for ferger er at varme fra kjølevann på hovedmotorer utnyttes til dette formål, men utnyttelse kan økes til å omfatte alle motorer om bord og også innbefatte utnyttelse av avgassvarme. I tillegg er det en effektiv løsning for konservering av varme å installere en termostank (isolert varmtvannstank) slik at en kan samle opp restvarme over dagen og bruke denne til å holde «lunk» i fergen over natten. Slike løsninger anvendes i dag men er ikke standard på alle ferger. Effekt av eksoskjel og termostank er utredet senere i rapporten. I tillegg til oppvarming av innredning kan varme utnyttes til eksempelvis oppvarming av mat i bysse, kiosk og/eller kafeteria.

Alternativt, om det ikke finnes tilstrekkelig varmebehov om bord kan det vurderes løsning hvor eksosvarme utnyttes til elektrisitetsproduksjon gjennom omvendt varmepumpe teknologi. Potensial for en slik løsning ligger på 10 til 15% av energiinnhold i eksosvarme. Løsningen krever i tillegg eksoskjel og er gjerne best egnet for gassmotorer som har relativt høy avgasstemperatur.

En annen form for varmegjenvinning er resirkulering av oppvarmet ventilasjonsluft. Ren re-sirkulering for deler av ventilasjonsluften er standard løsning, men det lar seg også gjøre å gjenvinne varme fra utskiftet luft ved bruk av roterende entalpi veksler. Effekt av dette sammen med et generelt energieffektivt ventilasjonssystem er utredet senere i rapporten (se kapittel 6.13.2).

Oppvarming av innredning kan også tenkes utført ved at tilført luft forvarmes gjennom en luft-til-luft varmeveksler mot utluft fra maskinrom.

For gassferger finnes det mulighet for å benytte lavtemperatur sirkuleringskrets fra LNG fordamping til ventilasjon kjøleformål. Dog er kjølebehov langs kysten vår relativt beskjedent og kjøling av ventilasjonsluft med bruk av varmeveksler mot sjøvann er normalt tilstrekkelig. Anslår dermed slike løsninger for ikke å være kostnadseffektive, og den er ikke videre utredet i dette studiet.

Energibesparende komponenter: Energibesparende komponenter og systemløsninger som kan anvendes i ferger innbefatter eksempelvis:

- Frekvensstyrte elektromotorer for normalt gående pumper og vifter hvor effektforbruk tilpasses behov i stedet for løsninger med fast turtall (og høy startestrøm).
- LED belysning i stedet for lysrør og glødelamper, innvendig og utvendig.
- Oppvarming med varmepumpe dersom elektrisk oppvarmingsbehov finnes (aktuelt ved kailigge) og gjerne basert på vann-til-luft gjennom sjøkasse.
- Ventilasjonsvifter med høy virkningsgrad montert i aerodynamisk gunstig utformede kanaler.

Effekt av disse tiltak er utredet senere i rapporten.

Redusert varmetap: Tap av varme fra innredning kan begrenses ved eksempelvis:

- Økt termisk isolering av dekk og skott.
- Økt isoleringsgrad i vinduer.

- Sluseløsninger eller tilsvarende for utvendige dører.

Dette er først og fremst aktuelt dersom det ikke finnes overskudd av restvarme (eksempel ren batteriferge). Samlet effekt av disse tiltakene er utredet senere i rapporten.

ENØK styringssystem: Med et aktivt styringssystem for elektriske forbrukere om bord kan en sikre at energi kun blir brukt når det er behov for det, og ikke går på «tomgang». Eksempler er:

- Aktiv styring av belysning som slår seg på når en er i rommet og slår seg automatisk av etter at person forlater rommet.
- Aktiv styring av oppvarming med termostater og døgnvariasjon.
- Aktiv styring av ventilasjon i henhold til kjøle-, sirkulasjon- og forbrenningsluft krav til maskinrom og tekniske rom.

Effekt av disse tiltak er utredet senere i rapporten.

Med batterier om bord har en også mulighet til å starte opp utstyr relativt momentant i stedet for å ha energikrevende systemer gående stand-by, eksempelvis:

- Aktuatorer for dekksluker, baugramper og baugvisir.
- Styremaskineri for rorpropellere.
- Standby generatorsett.

Effekt av de to førstnevnte er utredet senere i rapporten. For sistnevnte er det i utgangspunktet antatt at generatorsett går på relativt optimale driftspunkt (tiltak kunne vært aktuelt hvor dette vil medføre operasjon på ett generatorsett på høy last i stedet for to på moderat last men er til dels utredet gjennom presenterte hybridløsninger)

Mannskapslugarer: Medfører ekstra energiforbruk på grunn av økt vekt, økt vindareal og økt energiforbruk til oppvarming, ventilasjon, vannsirkulasjon, varmtvannoppvarming, kloakk vakuumlegg, kloakk rensing, belysning, underholdningsanlegg, bysse med mer. Dersom disse fjernes fra fergen oppnås energi- og kostnadsbesparelser. Samlet effekt av dette tiltaket er utredet senere i rapporten.

Lavenergi bysse/kiosk utstyr: En tradisjonell ferge er normalt utrustet med full bysse for matservering til mannskap samt kiosk eller kafeteria for passasjerer. Dette innbefatter en god del kjøkkenutstyr og energi kan spares ved å introdusere nyeste teknologi av lavenergiløsninger som ellers er tilgjengelig for bruk i industrien og for husholdninger.

Kiosk/kafeteria: Dersom en fjerner kiosk/kafeteria tilbud til passasjerer vil dette gi besparelser, spesielt om det er snakk om egen bysse for produksjon av varmmat med tilhørende kjølelager, oppvask med mer. Tilbud til passasjerer er viktig i enkelte samband og mindre viktig i andre og der er kun på større samband at kiosk/kafeteria virksomhet gir inntektsbidrag til rederi.

4.4.4 TILTAK FOR REDUSERT KLIMA- OG MILJØBELASTNING

I dette kapittelet presenteres tiltak som gir redusert klima/miljøbelastning utover valg av energibærer/energikilde og effekten av energieffektivisering.

Avgassrensing: Er først og fremst aktuell for dieseldrift hvor rensing av NO_x kan oppnås med katalysator som forbruker urea. Grad av NO_x reduksjon avhenger av tilført mengde urea og

driftsmønster. God effektivitet krever konstant høy eksstemperatur som oppnås ved konstant og relativt høy belastning på maskineriet.

For en IMO Tier II sertifisert hurtigløpende dieselmotor reduseres NO_x typisk fra 7,0 til 1,5 gNO_x/kWt ved bruk av katalysator under gunstige forhold (ref. tidligere beskrivelse – gunstige forhold for dieselhybrid og ugunstig for dieselmekanisk)¹⁸.

Gassfyrt kjel: Kan oppnå rundt 25% lavere CO₂ utslipp enn dieselfyrt kjel dersom en ikke slipper ut uforbrent metan.

¹⁸ Merk at en kombinasjon av motor uten Tier II sertifikat og SCR løsning vil gi lavere NO_x utslipp enn Tier II nivå samtidig som SFC også er lavere, men en slik løsning er i konflikt med regelverket som krever Tier II sertifikat på alle motorer.

5. GENERELLE TRENDER OG RESULTAT

I dette kapittelet presenteres parameterstudier hvor en undersøker energieffektivitet og klimabelastning for de ulike fergekonseptene med variasjon av størrelse, avgangsfrekvens, fart, distanse med mer. Det er gjort et utvalg av parameterkombinasjoner for å skaffe leseren en generell oversikt over mulighetene som finnes. Dersom en ønsker å undersøke helt spesifikke samband kan tilhørende digitalt verktøy anvendes.

Resultater som presentert i påfølgende underkapitler er gitt på følgende format:

Energibruk: Totalt energiforbruk for aktuell fergedrift presenteres per transportert PBE kapasitet og per tilbakelagt distanse, gitt med måleenhet MJ/PBE-km. Måleenhet er gunstig for å sammenligne alternative løsninger for samme samband, men gir også mulighet for å sammenligne energieffektivitet på ulike samband. Det tas dog ikke hensyn til faktisk transporterte PBE¹⁹. Merk at energiforbruk relateres til tilført energimengde, det vil si termisk energiinnhold for brennstoff og energimengde tatt fra nettet for landstrøm og hydrogenproduksjon.

CO₂ utslipp: Totalt ekvivalent CO₂ utslipp for aktuell fergedrift presenteres også per transportert PBE kapasitet og per tilbakelagt distanse, gitt med måleenhet gCO_{2EKV}/PBE-km. I tillegg presenteres spesifikt CO₂ utslipp for den aktuelle maskineri- og energibærer løsningen, gitt med måleenhet gCO_{2EKV}/kWt. Med ekvivalent utslipp tar en høyde for indirekte effekter som CH₄ utslipp, energiforbruk til elkraftproduksjon og biofuelproduksjon.

Relativ kostnad: Det presenteres en relativ kostnad for summen av anskaffelse- og energikostnader over 10 års drift med utgangspunkt i referanseløsning (som regel dieselmekanisk)²⁰. For noen av alternativene er også relativ kostnad sammenlignet mellom ulike alternativer for samme samband (eksempel en stor versus to små ferger).

Kostnader knytt til mannskap, vedlikehold, forsikring med mer samt billettinntekter er ikke inkludert. Dersom alle kostnadene til fergedrift var inkludert ville %-vis forskjell i kostnad høyst sannsynlig bli redusert da for eksempel mannskapskostander er en stor andel av totalen som varierer lite mellom alternativene.

Det tas her heller ikke hensyn til NO_x midler eller andre typer støtteordninger som ofte er tilgjengelig for «grønn» teknologi. Grunnen til dette er at midlers størrelse er prosjektavhengig. Eksempelvis gir ikke NO_x fondet støtte dersom SVV krever en batteriferge, men kan gi støtte dersom en reder fritt velger å benytte en batteriferge som erstatning for konvensjonell ferge.

Det må generelt bemerkes at usikkerhet knytt til kostnad er relativt høy og må anvendes deretter.

Ytterligere resultater er mulig å fremskaffe men en begrenser seg her for oversiktens skyld. Detaljerte data kan finnes med å se på samme scenario i digitalt verktøy.

¹⁹ Kun fergens PBE kapasitet og det forutsettes da at kapasitet på et gitt samband er godt tilpasset behov.

²⁰ Kostnadsberegning er en ren summasjon uten å ta hensyn til nåverdieffekt over 10 år.

5.1 VARIERENDE ANTALL OG STØRRELSE FERGER PÅ TYPISK SAMBAND

I dette tilfellet undersøkes effekt av varierende fergestørrelse og -antall på et typisk samband, to mindre ferger versus en større. Fergekonseptene er tradisjonelle enkelskrogs pendelferger bygget i stål, men med alternative maskineri- og energibærer løsninger. Dette er alternativer som har samme transportkapasitet per døgn men ulik avgangsfrekvens, hvor hensikt er å vise hvordan energieffektivitet og klimabelastning varierer disse imellom.

Et tenkt samband som undersøkes har følgende data:

Distanse : 6,8 km (3,7 nautisk mil)
Avganger : 32 per døgn per ferge
Produksjon : 3840 PBE/døgn (total sambands kapasitet)

I tabell 5-1 presenteres resultater i form av energiforbruk og CO₂ utslipp for alternativer med kombinasjonen 1 x 50 + 1 x 70 PBE ferger sett opp mot 1 x 120 PBE ferge i dette tenkte sambandet. I tillegg indikeres en relativ kostnad hvor 50 + 70 PBE dieselmekaniske ferger er utgangspunkt. For 120 bilers fergen er det vist to ulike situasjoner, en situasjon med samme fart som de mindre fergene og en med samme operasjonstid per døgn²¹.

Konsept	1 x 50 PBE + 1 x 70 PBE 10/10,4 knop & 6,8 km				1 x 120 PBE 10 knop & 6,8 km				1 x 120 PBE 12,9 knop & 6,8 km			
	Relativ kostnad [%]	Energi-forbruk [MJ/PBE-km]	CO ₂ EKV [g/PBE-km]	CO ₂ EKV [g/kWt]	Relativ kostnad [%]	Energi-forbruk [MJ/PBE-km]	CO ₂ EKV [g/PBE-km]	CO ₂ EKV [g/kWt]	Relativ kostnad [%]	Energi-forbruk [MJ/PBE-km]	CO ₂ EKV [g/PBE-km]	CO ₂ EKV [g/kWt]
Diesel mekanisk på vanlig fossil diesel	100	5,0	374	694	104	4,4	327	703	117	6,4	480	717
Diesel mekanisk med 100% biodiesel	108	5,0	87	161	112	4,4	76	162	128	6,4	109	162
Diesel/batteri hybrid uten lading fra land	110	4,9	366	641	110	4,3	319	648	123	6,3	466	649
Plugg-inn hybrid med diesel	141	4,1	255	413	125	3,3	193	370	141	5,3	344	457
Plugg-inn hybrid med 100% biodiesel og generelle tiltak	134	2,8	55	116	119	2,2	44	108	138	3,9	74	125
Ren batteriferge med generelle tiltak	135	1,8	37	75	116	1,5	31	75	131	2,2	46	75
Hydrogenferge	-	3,4	105	188	-	2,9	92	-	158	4,3	136	194

Tabell 5-1: Sammenligning to små mot en større ferge på samme samband²²

De viste alternativene i tabell 5-1 har alle samme dagsproduksjon gitt som PBE/dag men alternativet med 2 ferger i sambandet har hyppigere avgangsfrekvens. Med 50 + 70 PBE ferge er det avganger hver halve time. For 120 PBE med 12,9 knops fart er det avgang hver time. For 120

²¹ Økt fart benyttes for å kompensere for lengre tid ved kai. Nødvendig tid ved kai er beregnet til 5, 5½ og 9 minutter for hhv. 50, 70 og 120 PBE ferge (og 10, 10 ½ og 14 minutter for plugg-inn varianter).

²² Generelt beregnes tid til kai basert på nødvendig til for ilandkjøring og ombordkjøring, men for alternativer som baserer seg på lading fra land (ren batteriferge og plugg-inn hybrid) er tid ved kai økt for å oppnå tilstrekkelig ladetid. Samlet betyr dette at de 32 avgangene per dag medfører ulik avgangsfrekvens. Total operasjonstid for 3840 PBE/døgn varierer fra 16 timer for 50 + 70 PBE fergene og for 120 PBE fergen med 12,9 knops fart til nær 21 timer for 120 PBE fergen med 10 knop.

PBE med 10 knops fart blir avgangsfrekvens per 1 time og 20 minutter. Sammenligning mellom 50 + 70 PBE og 120 PBE med høyest fart synes dermed mest rettferdig.

For hybridløsninger og ren batteriferge blir nødvendig ladekapasitet og batteristørrelse som vist i tabell 5-2 (C1 laderate tilsvarer full lading innen 60 minutter).

	10 knop			10,4 knop			10 knop			12,9 knop		
	50 PBE Hybrid	50 PBE Plugg-inn	50 PBE Batteri	70 PBE Hybrid	70 PBE Plugg-inn	70 PBE Batteri	120 PBE Hybrid	120 PBE Plugg-inn	120 PBE Batteri	120 PBE Hybrid	120 PBE Plugg-inn	120 PBE Batteri
Batteri størrelse [kWt]	245	552	1006	293	724	1178	397	899	1373	762	1192	2051
Ladepkapasitet [kW] @ C1	-	500	1042	-	700	1221	-	900	1426	-	900	2125

Tabell 5-2: Batteri- og ladepkapasitet for alternativer vist i tabell 5-1

En observerer generelt fra tabell 5-1 at CO₂ utslipp er redusert i størrelsesorden 13% om en velger en stor ferge med 10 knops fart kontra 2 mindre, men med 12,9 knops fart på 120 PBE fergen er ting snudd på hodet og utslippet økt med 28%. Konklusjonen om hvilket av disse alternativ som er best for klimaet er derfor ikke entydig, og avhenger mye av hvor effektiv lasting/lossing en kan oppnå.

For plugg-inn hybrider baserer en seg generelt på rundt 25% av energien fra landstrøm, men denne kan i prinsippet variere fra null til 100% avhengig av om en har nok batterikapasitet og ladepkapasitet installert.

En observerer også fra tabell 5-1 at bruk av biodrivstoff eller kraft fra el-nettet er nødvendig for å oppnå spesifikt CO₂ utslipp under 500 gCO₂EQV/kWt nivå. En observerer at spesielt CO₂ utslipp reduseres i størrelsesorden 2% fra dieselmekanisk til dieselhybrid, en effekt som kommer av høyere gjennomsnittlig termisk virkningsgrad for sistnevnte. Ytterligere reduksjon kan kun oppnås med introduksjon av biodrivstoff og/eller elkraft fra nett. Eksempelvis observerer en også at spesifikt CO₂ utslipp varierer for dieselmekanisk løsning i 120 PBE fergen ved 10 og 12,9 knops fart, og dette kommer av at førstnevnte gjennomsnittlig opererer med lavere spesifikt drivstoff forbruk på motorene (f.eks. mindre andel tid på lavlast).

For hybridløsninger er det plugg-inn varianter som gir betydelig positiv klimaeffekt, og et gunstig alternativ er å kombinere plugg-inn hybrid med bruk av biodrivstoff. For plugg-inn hybridløsninger kan ulike kombinasjoner av batteri- og ladestrøm benyttes. Valgte kapasiteter som vist i tabell 5-2 er valgt for å gi merkbar klimaeffekt, men den generelle regelen er at dess større kapasitet dess bedre klimaeffekt.

For hydrogenalternativer som presentert i tabell 5-1 baserer en seg på hydrogenproduksjon med bruk av elektrisk energi fra el-nettet, noe som gjør at disse løsningene kommer dårligere ut enn f.eks. en ren batteriferge. Basert på en slik antagelse kan hydrogenalternativet aldri nå samme klimapotensial som en batteriløsning, men kan være et alternativ hvor ren batteridrift ikke er egnet.

Det kan også indikeres fra tabell 5-1 at en ren batteriferge er et relativt kostnadseffektivt alternativ sammenlignet med et annet klimavennlig alternativ som plugg-inn hybrid, en indikasjon som forventes å være gjeldende for samband hvor forholdene er passende for ren batteridrift

(men ikke for lang distanse og ikke for høy fart). Dieselmekanisk med 100% biodiesel kommer kostnadsgunstig ut men er følsom for prising av dette brennstoffet²³.

5.2 VARIERENDE SKROGKONSEPT FOR TYPISK SAMBAND

I dette tilfellet undersøkes effekt av alternative skrogkonsept for en 70 PBE ferge på et typisk samband. Skrogkonseptene er enkeltskrogsløsninger i stål og aluminium samt katamaran i aluminium, og undersøkes med alternative maskineri og energibærer løsninger. Dette er alternativer som alle har lik transportkapasitet.

Et tenkt samband som undersøkes har følgende data:

Distanse : 6,8 km (3,7 nautiske mil)
Overfartstid : 25 minutter
Tid til kai : 5½ minutter
Avganger : 32 per døgn
Produksjon : 2240 PBE/døgn (kapasitet)
Fart : ≈10 knop

I tabell 5-3 presenteres resultater.

Konsept	70 PBE enkeltskrog pendelferge bygget i stål				70 PBE enkeltskrog pendelferge bygget i aluminium				70 PBE katamaran pendelferge bygget i aluminium			
	Relativ kostnad [%]	Energi-forbruk [MJ/PBE-km]	CO ₂ KEV [g/PBE-km]	CO ₂ KEV [g/kWt]	Relativ kostnad [%]	Energi-forbruk [MJ/PBE-km]	CO ₂ KEV [g/PBE-km]	CO ₂ KEV [g/kWt]	Relativ kostnad [%]	Energi-forbruk [MJ/PBE-km]	CO ₂ KEV [g/PBE-km]	CO ₂ KEV [g/kWt]
Diesel mekanisk på vanlig fossil diesel	100	4,8	353	693	127	4,2	309	687	136	5,0	375	697
Diesel mekanisk med 100% biodiesel	108	4,8	82	161	135	4,2	72	161	145	5,0	87	162
Gasselektrisk med fossil LNG	120	5,1	358	644	158	4,6	322	659	166	5,5	379	646
Gasselektrisk med 100% biogass	148	5,1	100	180	183	4,6	90	183	196	5,5	106	181
Diesel/batteri hybrid uten lading fra land	110	4,7	346	642	140	4,1	303	638	150	4,9	366	643
Gass/batteri hybrid uten lading fra land	146	4,8	94	174	180	4,2	83	173	194	5,1	100	174
Plugg-inn hybrid med diesel	138	3,7	224	390	168	3,1	180	354	179	4,0	245	404
Plugg-inn hybrid med 100% biodiesel og generelle tiltak	134	2,6	50	112	163	2,1	42	105	176	3,0	58	117
Plugg-inn hybrid med gass	150	3,8	217	375	187	3,2	175	342	198	4,0	237	389
Plugg-inn hybrid med 100% biogass og generelle tiltak	154	2,7	53	118	189	2,2	44	110	205	3,1	61	124
Ren batteriferge med generelle tiltak	131	1,6	34	75	160	1,4	29	75	173	1,8	38	75
Hydrogenferge	-	3,2	100	190	-	2,9	90	190	-	3,4	107	188

Tabell 5-3: Ulike skrogkonsept med lik kapasitet og på samme samband²⁴

²³ Relativ kost for hydrogen alternativet er ikke vist pga. for høy usikkerhet knyttet til kostnadsanslag.

For hybridløsninger og ren batteriferge blir nødvendig ladekapasitet og batteristørrelse som vist i tabell 5-4 (C1 laderate tilsvarer full lading innen 60 minutter).

	Mono-stål Hybrid	Mono-stål Plugg-inn	Mono-stål Batteri	Mono-alu Hybrid	Mono-alu Plugg-inn	Mono-alu Batteri	Kat-alu Hybrid	Kat-alu Plugg-inn	Kat-alu Batteri
Batteri størrelse	296 kWt	724 kWt	1178 kWt	246 kWt	681 kWt	1018 kWt	321 kWt	745 kWt	1306 kWt
Ladekapasitet	-	700 kW @ C1	1221 kW @ C1	-	700 kW @ C1	1060 kW @ C1	-	700 kW @ C1	1359 kW @ C1

Tabell 5-4: batteri- og ladekapasitet for alternativer i tabell 5-3

En observerer fra tabell 5-3 at aluminium enkeltskrog er funnet til å være det mest energieffektive alternativet med rundt 12% energireduksjon sammenlignet med stål, noe som er forårsaket av kombinasjonen lavere motstand i transitt og redusert tid medgått til akselerasjon/retardasjon. Lavere motstand er et resultat av kombinasjonen redusert deplasement og redusert våt overflate. Redusert tid til akselerasjon og retardasjon er et resultat av at en lavere masse kan akselereres/retarderes hurtigere med samme propulsjonskraft.

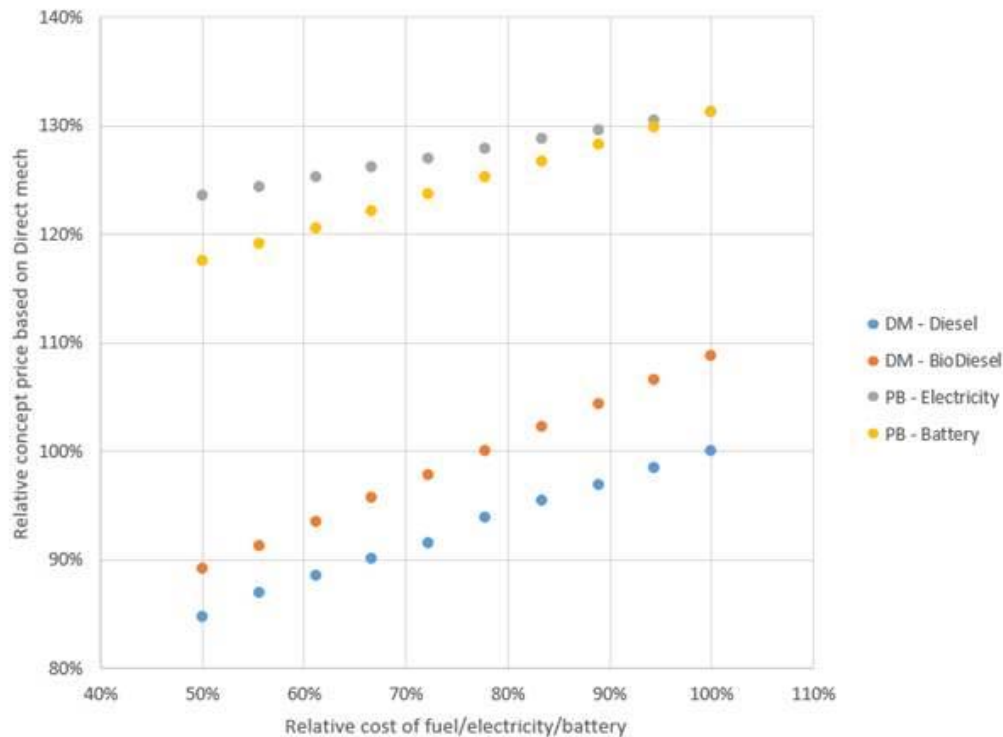
Mer bemerkelsesverdig observeres at aluminiumkatamaran kommer dårligst ut av de 3 alternativene i tabell 5-3. En ulempe med katamaran er større våt overflate (og derav høyt motstandsbidrag) selv om en sammenligner med et enkeltskrog med større deplasement, og i dette tilfellet synes ikke andre effekter av lavere vekt å gi tilstrekkelig positivt bidrag.

Et katamarankonsept i aluminium kan beviselig representere en energieffektiv løsning, men per i dag finnes det ikke direkte sammenlignbare løsninger mellom katamaran og enkeltskrog. Vår oppfatning er at samtlige av de 3 alternative skrogkonseptene i tabell 5-3 kan representere energieffektive løsninger utover dagens fergeflåte når energieffektivisering er i fokus og når de kombineres med generelle energieffektiviserende tiltak (se også kapittel 5.5). På et relativt kort samband (2 km) vil sannsynligvis et aluminium katamaran konsept komme bedre ut en stål enkeltskrog på grunn av økt akselerasjonsevne da blir mer dominerende.

Det indikeres også at en enkeltskrogs aluminiumsferge vil koste i størrelsesorden 27% mer enn det ellers identiske stålalternativet, altså en %-vis høyere kostnadsøkning enn %-vis reduksjon i energiforbruk. Men en skal merke seg at energieffektiviseringspotensialet for aluminium gjør at denne løsningen i gitte tilfeller kan gi en realiserbar løsning som stålalternativet ikke er i stand til.

²⁴ De 32 avgangene per dag utføres med identisk operasjonstid for alle alternativer med unntak av alternativer som baserer seg på lading fra land (batteriferge og plugg-inn hybrider) og total operasjonstid er økt fra 16 til nær 19 timer.

I figur 5-1 er det vist en følsomhetsanalyse med energikostnader og batterikostnader som variable.



Figur 5-1: Stål enkeltskrog dieselmekanisk (diesel/biodiesel) og batteriferge relativ kostand som funksjon av varierende batteri- og energikostnader

Kostnad på batterier, på diesel gassolje og biodiesel er i utgangspunktet basert på data fra kapitlene 6.14.3 og 6.15 (100% på x-akse) men varieres ned til 50%. En observerer at selv om strøm eller batterikostander reduseres til 50% så vil batterifergen fortsatt ikke konkurrere med en dieselmekanisk løsning i henhold til diesel prisnivå på 100%.

5.3 VARIERENDE FART OG FERGESTØRRELSE FOR TYPISK SAMBAND

I dette tilfellet undersøkes effekt av varierende transittthastighet og fergestørrelse for et typisk samband. Fergekonsept er tradisjonelle enkelskrog pendelferge bygget i stål, men med alternative maskineri og energibærer løsninger. Dette er alternativer som har lik transportkapasitet per døgn men ulik avgangsfrekvens, og hensikten er å vise hvordan energieffektivitet og klimabelastning varierer.

Et tenkt samband som undersøkes har følgende data:

Distanse : 11 km (5,9 nautiske mil)
Overfartstid : 40, 30 & 25 minutter
Avganger : 20, 28 & 36 per dag
Produksjon : 2500 PBE/døgn (kapasitet)
Operasjon : 16,8 timer/døgn (18,2 timer/døgn for plugg-inn alternativer)
Fart : 9½, 14 & 19,8 knop

I tabell 5-5 presenteres resultater.

Konsept	125 PBE – 9,5 knop 11 km samband				90 PBE – 14 knop 11 km samband				70 PBE – 19,8 knop 11 km samband			
	Relativ kostnad [%]	Energi-forbruk [MJ/PBE-km]	CO ₂ KEV [g/PBE-km]	CO ₂ KEV [g/kWt]	Relativ kostnad [%]	Energi-forbruk [MJ/PBE-km]	CO ₂ KEV [g/PBE-km]	CO ₂ KEV [g/kWt]	Relativ kostnad [%]	Energi-forbruk [MJ/PBE-km]	CO ₂ KEV [g/PBE-km]	CO ₂ KEV [g/kWt]
Diesel mekanisk på vanlig fossil diesel	100	3,6	270	689	98	7,5	559	698	174	21,2	1 591	717
Diesel mekanisk med 100% biodiesel	106	3,6	63	161	111	7,5	131	164	211	21,2	365	165
Gasselektrisk med fossil LNG	112	4,0	280	659	111	8,9	626	691	195	26,8	1 878	718
Gasselektrisk med 100% biogass	133	4,0	78	183	159	8,9	171	189	339	26,8	507	194
Diesel/batteri hybrid uten lading fra land	105	3,5	259	640	107	7,6	568	657	199	22,4	1 676	664
Gass/batteri hybrid uten lading fra land	111	3,6	249	610	110	7,9	553	627	191	23,6	1 652	633
Plugg-inn hybrid med diesel	124	2,8	173	407	130	7,1	501	564	238	22,0	1 625	637
Plugg-inn hybrid med 100% biodiesel og generelle tiltak	121	2,0	38	116	131	5,7	107	147	249	18,5	345	160
Plugg-inn hybrid med gass	131	2,9	168	391	134	7,3	488	540	231	23,1	1 600	608
Plugg-inn hybrid med 100% biogass og generelle tiltak	134	2,0	41	122	155	5,9	117	157	316	19,5	383	172
Ren batteriferge med generelle tiltak	120	1,2	25	75	-	-	-	-	-	-	-	-
Hydrogenferge	-	2,4	76	188	-	5,2	165	196	-	15,1	477	203

Tabell 5-5: Variasjon av fergestørrelse og -fart men med lik døgnkapasitet på samme samband²⁵

²⁵ Det er benyttet lik transportkapasitet og lik operativ tid per døgn for alle tre fergestørrelsene, men økt operasjonstid per døgn for plugg-inn alternativene. Generelt beregnes tid i havn basert på nødvendig til for ilandkjøring og ombordkjøring (henholdsvis 10, 7 og 5½ minutter), men for alternativer som baserer seg på

En observerer fra tabell 5-5 at å oppnå økt avgangsfrekvens med mindre og hurtigere ferger gir dårlig klimaeffekt. Sammenlignet med 125 PBE fergen gir 90 PBE løsningen en energiøkning på 108% og 70 PBE fergen en energiøkning på hele 489%. Årsaken til en slik enorm økning i energiforbruk er kombinert effekt av at økt hastighet er ugunstig og mindre ferger er mindre egnet til høy hastighet enn de større. En observerer også at biofuel og hydrogen kommer ut som det eneste alternativer for å oppnå utslipp under 500 gCO_{2EKV}/kWt om høy hastighet er et krav.

For hybridløsninger og ren batteriferge blir nødvendig ladekapasitet og batteristørrelse som vist i tabell 5-6 (C1 laderate tilsvarer full lading innen 60 minutter).

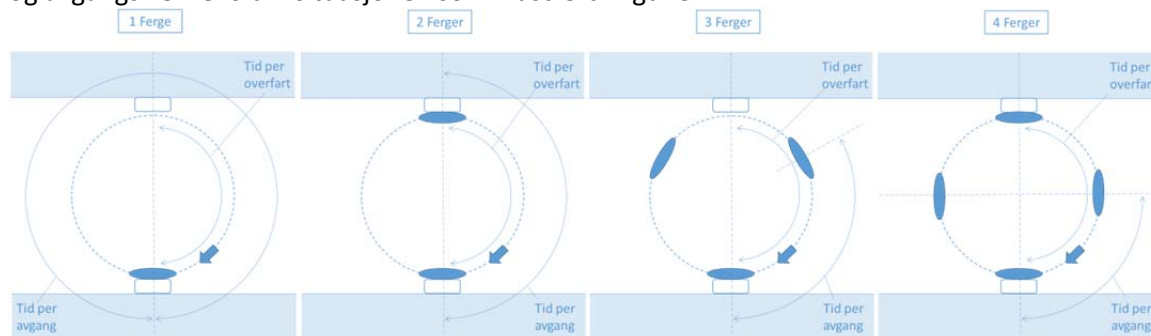
	125 PBE @ 9,5 knop Hybrid	125 PBE @ 9,5 knop Plugg-inn	125 PBE @ 9,5 knop Batteri	90 PBE @ 14 knop Hybrid	90 PBE @ 14 knop Plugg-inn	90 PBE @ 14 knop Batteri	70 PBE @ 19,8 knop Hybrid	70 PBE @ 19,8 knop Plugg-inn	70 PBE @ 19,8 knop Batteri
Batteri størrelse	360 kWt	1039 kWt	1845 kWt	1033 kWt	1560 kWt	-	3289 kWt	3521 kWt	-
Ladekapasitet	-	1000 kW @ C1	1914 kW @ C1	-	850 kW @ C1	-	-	700 kW @ C1	-

Tabell 5-6: Batteri- og ladekapasiteter for alternativer i tabell 5-5

Nødvendige størrelser og kapasiteter for 90 og 70 PBE fergene er såpass at et rent batterikonsept ikke er hensiktsmessig og dermed ikke presentert i tabell 5-5. Derimot, om en vurderer en plugg-inn hybridløsning er en fortsatt innenfor mulige kapasiteter. En observerer også at nødvendig ladekapasitet er relativt lav for 90 og 70 PBE hybridferger grunnet betydelig lading fra generatorsett om bord (dvs lading fra land + generator tilfredsstiller C1 laderate).

En observerer av tabell 5-5 at bruk av biofuel er et realistisk alternativ til å oppnå klimavennlige løsninger dersom høy fart er et absoluttkrav, det være seg konvensjonelle maskineriløsninger som benytter biofuel eller aller helst i kombinasjon med et plugg-inn hybridkonsept. For hydrogenalternativet må det verifiseres om krav til H₂ lagringskapasitet/bunkringsintervall lar seg gjøre.

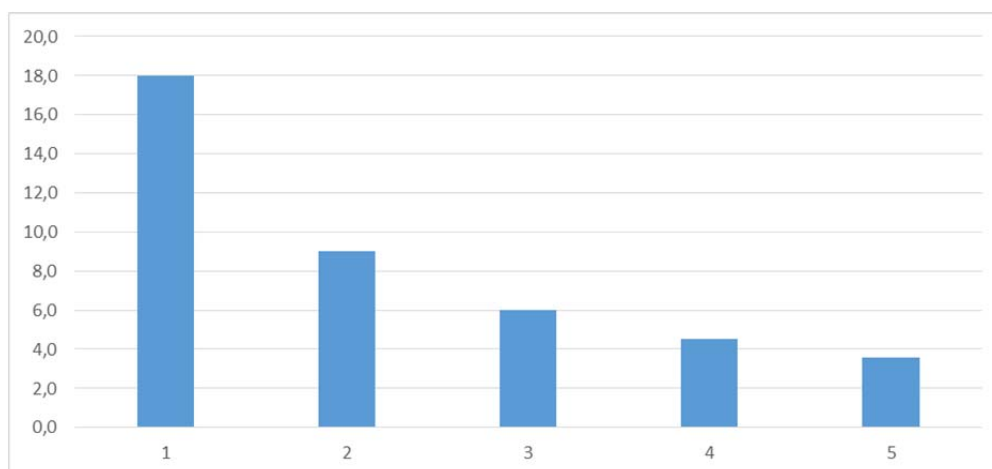
Et mer klimavennlig alternativ er at en i stedet for å øke hastighet på en mindre ferge heller introduserer flere like store ferger men reduserer fart. Dersom en vil opprettholde døgncapasitet og avgangsfrekvens blir situasjonen som illustrert i figur 5-1.



Figur 5-1: Illustrasjon, alternativer med 1, 2, 3 eller 4 ferger til å operere ett samband

For alternativene vist i figur 5-1 reduseres hastighet som funksjon av antall ferger på sambandet som vist i figur 5-2.

lading fra land (ren batteriferge og plugg-inn hybrid) er tid ved kai økt til henholdsvis 15, 12 og 10% minutter for å oppnå tilstrekkelig ladetid (henholdsvis 13, 10 og 8 minutter effektiv lading antatt).



Figur 5-2: Redusert fart med økende antall like ferger som illustrert i figur 5-1

Eksemplet som figur 5-2 er basert på et 10 km samband med avgangsfrekvens på 35 minutter. En observerer at en ferge med 18 knops fart kan erstattes av to ferger med samme kapasitet som går med 9 knops fart. Å redusere farten ytterligere til 6 knop som en oppnår med 3 ferger kan være å dra det for langt da overfartstid for en, to og tre ferger er på henholdsvis 18, 36 og 54 minutter.

5.4 VARIERENDE DISTANSE FOR TYPISK FERGE

I dette tilfellet undersøkes effekt av varierende distanse og overfartstid for en typisk 70 PBE ferge. Fergekonsept er tradisjonelle enkelskrog pendelferge bygget i stål, men med alternative maskineri og energibærer løsninger. Hensikten er å vise hvordan energieffektivitet og klimabelastning varierer med sambands lengde.

En tenkt operasjon som undersøkes har følgende data:

Distanse : 3,6 - 6,8 & 11,3 km
Avganger : 48, 32 & 22 per dag
Overfart : 15, 25 & 40 minutter
Produksjon : 3360, 2240 & 1540 PBE/døgn
Fart : ≈10 knop

I tabell 5-7 presenteres resultater.

Konsept	70 PBE – 15 minutters overfart & 10 knops hastighet				70 PBE – 25 minutters overfart & 10 knops hastighet				70 PBE – 40 minutters overfart & 10 knops hastighet			
	Relativ kostnad [%]	Energi-forbruk [MJ/PBE-km]	CO ₂ EV [g/PBE-km]	CO ₂ EV [g/kWt]	Relativ kostnad [%]	Energi-forbruk [MJ/PBE-km]	CO ₂ EV [g/PBE-km]	CO ₂ EV [g/kWt]	Relativ kostnad [%]	Energi-forbruk [MJ/PBE-km]	CO ₂ EV [g/PBE-km]	CO ₂ EV [g/kWt]
Diesel mekanisk på vanlig fossil diesel	100	5,4	398	702	102	4,8	353	693	104	4,4	328	690
Diesel mekanisk med 100% biodiesel	108	5,4	91	161	110	4,8	82	161	113	4,4	77	162
Gasselektrisk med fossil LNG	120	5,9	408	662	122	5,1	358	644	123	4,8	330	635
Gasselektrisk med 100% biogass	147	5,9	113	184	150	5,1	100	180	153	4,8	93	178
Diesel/batteri hybrid uten lading fra land	109	5,2	388	640	112	4,7	346	642	113	4,3	320	644
Gass/batteri hybrid uten lading fra land	119	5,4	372	611	122	4,8	332	612	123	4,4	307	614
Plugg-inn hybrid med diesel	134	3,4	161	243	140	3,7	224	390	146	3,8	249	478
Plugg-inn hybrid med 100% biodiesel og generelle tiltak	128	2,0	42	82	136	2,6	50	112	143	2,8	54	130
Plugg-inn hybrid med gass	148	3,4	157	236	153	3,8	217	375	157	3,8	241	458
Plugg-inn hybrid med 100% biogass og generelle tiltak	143	2,1	43	84	157	2,7	53	118	166	2,9	57	138
Ren batteriferge med generelle tiltak	121	1,8	37	75	133	1,6	34	75	150	1,5	32	75
Hydrogenferge	-	3,6	112	191	-	3,2	100	190	-	3,0	93	189

Tabell 5-7: Samme ferge med samme fart på ulike sambands lengder²⁶

Generelt observerer man av tabell 5-7 at fergen er mer energieffektiv for transport over lengre distanser enn de korte, da maskineri operer mest effektivt under transitt. Men for plugg-inn

²⁶ Generelt er det antatt at fergen ligger 5½ minutt til kai ved hvert anløp, men for alternativer som baserer seg på lading fra land er tid ved kai økt til 10½ minutt.

hybridferge observeres det motsatte. Årsak til dette er at plugg-inn hybridferger får redusert sin andel av tilført energi fra el-nettet med økende avstand, og forbrenning av drivstoff er langt mindre energieffektivt enn kraft fra el-nettet.

For hybridløsninger og ren batteriferge blir nødvendig ladekapasitet og batteristørrelse som vist i tabell 5-8 (C1 laderate tilsvarer full lading innen 60 minutter).

	70 PBE & 15 min Hybrid	70 PBE & 15 min Plugg-inn	70 PBE & 15 min Batteri	70 PBE & 25 min Hybrid	70 PBE & 25 min Plugg-inn	70 PBE & 25 min Batteri	70 PBE & 40 min Hybrid	70 PBE & 40 min Plugg-inn	70 PBE & 40 min Batteri
Batteri størrelse	250 kWt	659 kWt	714 kWt	293 kWt	724 kWt	1178 kWt	317 kWt	815 kWt	1857 kWt
Ladekapasitet	-	700 kW @ C1	742 kW @ C1	-	700 kW @ C1	1221 kW @ C1	-	700 kW @ C1	1919 kW @ C1

Tabell 5-8: Batteri- og ladekapasiteter for alternativer i tabell 5-7

En observerer av tabell 5-8 at nødvendig batteri- og ladekapasitet øker betydelig med økende distanse for ren batteriferge, mens en med en plugg-inn hybrid er i stand til å holde kapasiteter nede. En plugg-inn hybridferge med 815 kWt batteri og 700 kW lading kan operere på alle tre samband med klimautslipp som presentert i tabell 5-7. En plugg-inn hybridferge med mindre kapasiteter enn dette kan også operere på alle tre samband men da med økte klimautslipp (pga. redusert andel energi hentet fra el-nett).

Fra tabell 5-7 synes et rent batterikonsept å komme bedre ut enn plugg-inn hybrid for korte samband hvor batteristørrelse for førstnevnte kan holdes nede. For lengre samband nærmer hybridfergen seg på grunn av økende batterikostnader for den rene batterifergen.

5.5 GENERELLE ENERGIEFFEKTIVISERENDE TILTAK

I dette tilfellet undersøkes effekt av generelle energieffektiviserende tiltak for 70 og 125 PBE ferger. Fergekonsept er tradisjonelle enkelskrog pendelferge med diesel-mekanisk maskineri. Hensikten er å vise hvordan slike generelle tiltak påvirker energieffektivitet.

Et tenkt samband som undersøkes har følgende data:

Distanse : 6,8 km
Overfartstid : 25 minutter
Avganger : 32 per døgn
Operasjon : 16 timer/døgn
Fart : ≈10 knop

I tabell 5-9 presenteres resultater for alternative generelle tiltak for 70 og 125 PBE diesel-mekanisk ferge som går med 10 knops transitthastighet. Generelt er det antatt at fergen ligger henholdsvis 5½ og 10 minutter til kai ved hvert anløp.

Tiltak/ Forbruker	Energiforbruk - 70 PBE [GJ]							Energiforbruk - 125 PBE [GJ]						
	Totalt	Propulsjon	Oppvarming	Belysning	Elektromotorer	Annet	Nattligge	Totalt	Propulsjon	Oppvarming	Belysning	Elektromotorer	Annet	Nattligge
Utgangspunkt	73,6	50,0	4,2	2,0	10,1	5,7	1,6	117,9	77,6	7,4	3,5	17,8	10,1	1,7
Automatisk fortøyning	1,6	1,6	-	-	-	-	-	4,3	4,3	-	-	-	-	-
Silikon bunnstoff	3,6	3,6	-	-	-	-	-	5,6	5,6	-	-	-	-	-
Termotank	0,4	-	-	-	-	-	0,4	0,5	-	-	-	-	-	0,5
Eksoskjel	1,0	-	1,0	-	-	-	-	1,9	-	1,9	-	-	-	-
Ventilasjonsrotor	0,4	-	0,4	-	-	-	0,03	0,73	-	0,7	-	-	-	0,03
Batterielektrisk erstatte RORO HPU	0,5	-	-	-	0,5	-	-	1,2	-	-	-	1,2	-	-
Frekvensstyrte elektromotorer	2,6	-	-	-	2,5	-	0,1	4,6	-	-	-	4,5	-	0,1
LED belysning	1,9	-	-	1,6	-	-	0,25	3,1	-	-	2,8	-	-	0,3
Økt termisk isolasjon	0,9	-	0,8	-	-	-	0,07	1,6	-	1,5	-	-	-	0,08
ENØK styring	1,2	-	0,2	0,1	0,5	0,3	0,08	2,1	-	0,4	0,2	0,9	0,5	0,08
Fjerne mannskapsfasiliteter	2,9	0,6	0,4	0,2	1,0	0,6	0,16	4,8	0,8	0,7	0,3	1,8	1,0	0,2
Fjerne kiosk/kafeteria	2,3	-	-	-	-	2,3	-	4,0	-	-	-	-	4,0	-
Økt landstrøm	0,1	-	-	-	-	-	0,1	0,1	-	-	-	-	-	0,1
Lavenergi bysse- og kioskutstyr	0,1	-	-	-	-	0,1	0,01	0,2	-	-	-	-	0,2	0,01
Aluminium skrog	8,9	8,9	-	-	-	-	-	13,3	13,3	-	-	-	-	-
Reversert varmpumpe	3,8	-	0,7	0,3	1,7	1,0	0,08	6,1	-	1,1	0,5	2,8	1,6	0,08
Thruster med virkningsgrad $\eta_0 = 0.7$	10,8	10,8	-	-	-	-	-	16,8	16,8	-	-	-	-	-
Netto resultat (reduksjon i %)	40,6 (45%)	28,6 (43%)	2,2 (47%)	0,3 (85%)	5,1 (49%)	2,4 (58%)	0,7 (58%)	64,2 (46%)	43,7 (44%)	3,9 (47%)	0,5 (85%)	8,9 (50%)	4,4 (56%)	0,7 (61%)

Tabell 5-9: Virkning av generelle energieffektiviserende tiltak for to ulike ferger

Det observeres fra tabell 5-9 en betydelig energieffektiviserende forbedring om flest mulig av disse tiltak kombineres. Oppsummering i tabellen er en kombinasjon av alle aktuelle tiltak som lar seg kombinere (vist med blå farge i tabell 5-9²⁷). Energieffektiviseringspotensial baserer seg på data som presentert i kapittel 6.13.

²⁷ Reversert varmpumpe benytter eksoskjel men energigevinst tas ut kun som elektrisitet (og ikke som varmtvann til oppvarming fra eksoskjel. Lavenergi bysseutstyr kan ikke anvendes da bysseutstyr allerede er fjernet.

Størst effekt oppnås om en kan benytte en thruster med frivirkningsgrad på 70%, noe som i så tilfelle ville være en større og dyrere enhet enn det en normalt ville tatt ut for aktuelt effektbehov. Nest størst effekt oppnås av å endre skrog fra stål til aluminium, men som diskutert tidligere indikeres relativt høye kostnader for dette tiltaket. Et annet effektivt tiltak er bruk av silikon bunnstoff eller tilsvarende metoder for å redusere skrogruhet og dermed oppnå redusert friksjonsmotstand. Fjerning av mannskapsfasiliteter og/eller fjerning av kiosk/kafeteria om bord er også effektiv energieffektivisering, og medfører i tillegg en redusert anskaffelseskostnad. Frekvensstyring av elektromotorer til pumper og vifter om bord gir betydelig energieffektivisering men forutsetter også at potensialet utnyttes med noe mer avansert fjernstyring og automasjon enn dagens standard. Reversert varmepumpe for produksjon av elektrisk energi fra eksosvarme bør utredes mer i detalj for å se effekt opp mot kostnadsnivå.

Tiltak presentert i tabell 5-9 som ikke er relevante for ren batteriferge er:

- Termotank (akkumulerer gjenvunnet spillvarme)
- Eksoskjel
- Økt landstrøm
- Reversert varmepumpe (gjenvinner energi fra eksosvarme)

Heller ikke tiltak for å redusere tidsbruk ved kai som beskrevet i kapittel 4.4.1 er spesielt relevant for en ren batteriferge og plugg-inn hybrider da en likevel trenger lengre tid til lading av batterier enn det en normalt vil bruke av tid til lossing og lasting av kjøretøy.

For rene batteriferges og hybridferges er derimot bruk av permanentmagnetmotor til fremdrift som beskrevet i kapittel 4.4.2 relevant som energieffektiviserende tiltak utover de nevnt i tabell 5-9. Automatisk fortøyning vil reletivt sett gi større virkning da en batteriferge ligger mer til kai.

I kapittel 6.14.10 er det presentert en del kostnadsdata for ulike generelle energieffektiviserende tiltak. Grunnet relativt høy usikkerhet til disse tallene og til dels manglende kostandsdata har en valgt ikke å presentere kostnadseffektivitet for slike tiltak. Leseren vil likevel gjennom kapittel 6.14.10 kunne danne seg et inntrykk av hva som er dyre og hva som er rimelige tiltak.

Totalt sett viser tabell 5-9 at energieffektiviseringspotensialet for hotell- og hjelpesystemer samlet sett er på henholdsvis 55 og 62% reduksjon.

5.6 ENERGIEFFEKTIVISERING MED PLUGG-INN HYBRIDFERGE

I dette tilfellet undersøkes effekt av plugg-inn hybridferge som funksjon av varierende overfartslengde og fart. Skrogkonsept er enkeltskrog pendelferge bygget i aluminium. Hensikten er å vise hvordan samme fergekonsept kan benyttes i ulike samband eller med varierende avgangsfrekvens og hvordan dette påvirker energieffektivitet.

I tabell 5-10 presenteres resultater med plugg-inn diesel/batteri aluminium hybridferger på 70 og 125 PBE for ulik overfart og/eller hastighet²⁸.

Scenario	70 PBE aluminium Plugg-inn hybrid Uten generelle tiltak				70 PBE aluminium Plugg-inn hybrid Inkludert generelle tiltak				125 PBE aluminium Plugg-inn hybrid Uten generelle tiltak			
	Andel land-strøm [%]	Energi-forbruk [MJ/PBE-km]	CO ₂ EKV [g/PBE-km]	CO ₂ EKV [g/kWt]	Andel land-strøm [%]	Energi-forbruk [MJ/PBE-km]	CO ₂ EKV [g/PBE-km]	CO ₂ EKV [g/kWt]	Andel land-strøm [%]	Energi-forbruk [MJ/PBE-km]	CO ₂ EKV [g/PBE-km]	CO ₂ EKV [g/kWt]
15 minutter overfart @ 10 knop	100	2,1	44	75	100	1,6	33	75	100	1,9	40	75
15 minutter overfart @ 12 knop	47	3,8	187	260	46	3,0	151	268	48	3,4	164	255
15 minutter overfart @ 14 knop	26	6,1	369	394	25	4,9	300	403	27	5,3	318	385
25 minutter overfart @ 10 knop	42	2,8	144	286	41	2,2	115	292	42	2,4	126	285
25 minutter overfart @ 12 knop	23	4,3	266	414	22	3,5	218	425	23	3,7	228	412
40 minutter overfart @ 10 knop	22	3,2	199	422	21	2,5	159	429	24	2,7	165	410

Tabell 5-10: Plugg-inn enkeltskrog aluminium hybridferger på ulike samband

I tabell 5-10 er det vist to alternative 70 PBE ferger, en uten generelle energieffektiviserende tiltak inkludert og en med (ref. tabell 5-9). 70 PBE fergen uten generelle tiltak som vist tabell 5-10 er en plugg-inn hybrid med 1100 kWt batterikapasitet og krav til 950 kW ladekapasitet fra land. For 70 PBE ferge med generelle tiltak oppnås tilsvarende med 985 kWt batteri og 705 kW lading.

For 125 PBE versjonen vist i tabell 5-10 (uten generelle tiltak) er det lagt opp til 1700 kWt batterier om bord og 1050 kW ladekapasitet. Opplading av batterier ligger maksimalt på C1 nivå (full lading i løpet av 60 minutter), dersom dette økes til C2 vil nødvendig batterikapasitet i fergen halveres²⁹.

En observerer av tabell 5-10 at en slik ferge kan operere som ren batteriferge for korte samband på lav fart, men en observerer at selv for lange samband på lav fart eller korte samband med relativt høy fart kan det oppnås moderate utslippsnivå sammenlignet med konvensjonelle ferger. Samtlige scenario en har sett på oppnås spesifikt CO₂ utslipp innenfor 500 gCO₂EKV/kWt nivå.

Implementering av generelle energieffektiviserende tiltak gir betydelig virkning både i redusert energiforbruk og redusert krav til batteri/ladekapasitet. Men i tabell 5-10 observerer en at spesifikt CO₂ utslipp er tilnærmet uforandret da andel energi hentet fra el-nettet er likt for de to alternativene.

²⁸ Generelt er det antatt at fergen ligger 10% og 15 minutter til kai for henholdsvis 70 og 125 PBE ferge ved hvert anløp.

²⁹ For C2 lading bør en ha et svært effektivt batteri kjølesystem (eksempelvis vannkjøling) slik at en samtidig oppnår akseptabel levetid.

Fergen kan også operere som hybridferge uten landstrøm dersom det ikke er tilrettelagt for plugg-inn på aktuelt fergeleie. Dette forutsetter dog at installert generatorkapasitet er tilstrekkelig til å dekke fergens gjennomsnittlige energibehov.

For samtlige alternativer i tabell 5-10 er det 15 minutters overfart ved 14 knop som er dimensjonerende for batteristørrelse, og mindre kapasiteter er mulig dersom dette senarioet ikke var relevant.

5.7 BEGRENSNINGER FOR REN BATTERIFERGE

I dette tilfellet undersøkes begrensninger i bruk av batteriferge som funksjon av fart, distanse og størrelse på fergen. Skrogkonsept er enkelskrog pendelferge bygget i aluminium og med alle aktuelle energibesparende tiltak implementert. Hensikten er å vise begrensninger i et rent batterifergekonsept ved gitt installert batterikapasitet og tilgjengelig landstrømkapasitet.

I tabell 5-11 presenteres eksempler på rekkevidde og begrensninger med ren aluminium batteriferge³⁰.

Batteri og landstrøm-begrensning	70 PBE aluminium batteriferge Energibesparende tiltak implementert				125 PBE aluminium batteriferge Energibesparende tiltak implementert			
	Maks overfart @ 8 knop	Maks overfart @ 10 knop	Maks overfart @ 12 knop	Maks overfart @ 14 knop	Maks overfart @ 8 knop	Maks overfart @ 10 knop	Maks overfart @ 12 knop	Maks overfart @ 14 knop
500 kWt batteri & 1000 kW C2 lading	9 km	6.5 km	5 km	-	8 km	6 km	-	-
1000 kWt batteri & 2000 kW C2 lading	19 km	14 km	10.5 km	7.5 km	17 km	13 km	10 km	5.5 km
2000 kWt batteri & 4000 kW C2 lading	39 km	29 km	22 km	15.5 km	35 km	27 km	21 km	14.5 km

Tabell 5-11: Rekkevidde for enkelskrog aluminium batteriferge som funksjon av fart og distanse

Merk at i tabell 5-11 er alle batterikapasiteter presentert med basis i C2 laderate. Batteristørrelse må dobles dersom en skal basere seg på C1.

En observerer av tabell 5-11 at for alternativet med 500 kWt batterikapasitet lar ikke høyere hastighet seg gjøre. Energiforbruk til transittering overgår i disse tilfellene batteriets kapasitet³¹.

Merk at i tabell 5-11 er det vist prestanda for ferge hvor en har tatt generelle tiltak i bruk for å redusere energibehov.

³⁰ Generelt er det antatt at fergen ligger 10% og 15 minutter til kai ved hvert anløp for henholdsvis 70 og 125 PBE ferge.

³¹ Basert på batteri utnyttelse innenfor forsvarlige rammer for akseptabel levetid som diskutert i kapittel 6.10.

5.8 SAMMENLIGNING MED IDENTISK RUTETABELL

Generelt har en i kapitlene over akseptert at plugg-inn hybrider og rene batterifergeer trenger mer tid til kai for å oppnå tilstrekkelig lading. Men dette betyr samtidig at en ikke sammenligner alternativene etter en identisk rutetabell. I dette kapittelet undersøkes scenarioer med identisk rutetabell og hvor alternativer som ikke trenger lading benytter tilgjengelig tid mellom avganger til å redusere transittthastighet.

Et tenkt samband som undersøkes har følgende data:

Distanse : 6,8 km
Operativ : 16,3 & 18,1 timer/døgn
Avganger : 32 per døgn
Produksjon : 2240 & 4000 PBE/døgn (kapasitet)

I tabell 5-12 presenteres utvalgte konsept. Det er antatt at batterifergen og plugg-inn hybrid med full ladetid ligger 10½ og 14 minutter til kai ved hvert anløp for henholdsvis 70 og 125 PBE ferge. For resterende alternativ er liggetid henholdsvis 5½ og 9 minutt.

Konsept	1 x 70 PBE 6,8 km & 32 avganger				1 x 125 PBE 6,8 km & 32 avganger			
	Transitt hastighet [knop]	Energi- forbruk [MJ/PBE-km]	CO ₂ EKV [g/PBE-km]	CO ₂ EKV [g/kWt]	Transitt hastighet [knop]	Energi- forbruk [MJ/PBE-km]	CO ₂ EKV [g/PBE-km]	CO ₂ EKV [g/kWt]
Diesel mekanisk på vanlig fossil diesel	9,6	4,4	325	691	9,6	4,0	294	700
Diesel mekanisk med 100% biodiesel	9,6	4,4	76	161	9,6	4,0	68	162
Diesel/batteri hybrid med kort ladetid (utnytter kun laste/lossetid)	9,6	3,8	260	516	9,6	3,3	220	493
Diesel/batteri hybrid med full ladetid fra land	10	3,7	224	390	10	3,3	193	370
Ren batteriferge med generelle tiltak	10	1,6	34	75	10	1,5	31	75

Tabell 5-12: Sammenligning av ulike konsept ved identisk rutetabell

En observerer av tabell 5-12 at det ikke er all verdens fartsreduksjon som oppnås for alternativene som ikke krever lading i havn, men det oppnås likevel en reduksjon i energiforbruk på 8 – 9% sammenlignet med samme rute i 10 knops fart.

For plugg-inn hybridløsningen blir resultatet som en ser av tabell 5-12 likt eller marginalt økt energiforbruk om en ikke legger inn økt ladetid i havn. Her er det større andel energi fra generatormotor som motvirker energireduksjon på grunn av lavere fart.

En kan dermed konkludere at rene batteriløsninger er det beste alternativet for lavest mulig klimautslipp, selv om økt tid til kai medfører høyere transittthastighet for å holde samme rute. Det som imidlertid alltid er viktig er at rutetabell defineres med tilstrekkelig liggetid i havn for lading av batterier.

6. ANVENDT METODE, IDEALISERINGER OG ANTAGELSER

I påfølgende underkapitler er teoretiske metoder, idealiseringer og antagelser som benyttet i dette studiet og ved utvikling av tilhørende digitalt verktøy presentert.

6.1 DATABASE

Det er opparbeidet en database av fergekonsepter som danner basis for studien og tilhørende digitalt verktøy. Databasen omfatter 40 forskjellige kombinasjoner av skrog, arrangement, størrelser og skrogmaterial, hvor følgende er variert:

- Ferge i kapasitet fra 20 til 290 PBE
- Enkeltskrog og katamaran skrogkonsepter
- Stål og aluminium byggemateriale

Videre er følgende maskineri-, energilagre- og energibærer prinsipper inkludert i databasen:

- Dieselmekanisk fremdrift
- Dieselelektrisk fremdrift
- Gasselektrisk fremdrift
- Diesel/batteri hybrid drift (med eller uten plugg-inn mulighet)
- Gass/batteri hybrid drift (med eller uten plugg-inn mulighet)
- Hydrogendrift
- Ren batteridrift

Totalt sett utgjør databasen dermed 236 ulike konsepter.

Databasen benytter relevante enkeltskrog stål nybyggingsreferanser som LMG Marin har tilgjengelig fra perioden 2005 til 2015 for skrogdata (38, 40 70, 125, 165 og 212 PBE versjoner i tillegg til 290 bilers ferge som er modelltestet). Videre blir det fylt ut med teoretisk beregning og CFD analyser mellom referansene og for å oppnå den komplette databasen.

For katamaran alternativet har en i mangel av pendelferge referanser utelukkende basert seg på teoretiske beregninger og CFD analyser. Således er usikkerhet noe høyere for disse alternativene sammenlignet med enkeltskrog.

6.2 MOTSTAND, FREMDRIFT OG ENERGIUTNYTTELSE

6.2.1 SKROGMOTSTAND

Anvendt metodikk for beregning av skrogmotstand er som følger:

- Bestemme fartøys hoveddimensjoner og arrangement basert på ønsket PBE kapasitet.
- Beregne skrogvekt basert på tilgjengelig referanse eller basert på 3D panelmodell av fartøys hovedstruktur bygget opp i Rhino programvare³².
- Beregne totalt lettskip basert på vektdata fra tidligere prosjekt men justert med realistiske enhetsvekter for hovedkomponenter spesifikt for hver ferge (se kapittel 6.5.1).

³² Panel tilegnes materialdimensjoner og eksporteres ut som makro i Excel regneark og hvor det i etterkant legges til diverse vekter utover hovedstruktur som modellen ikke får med seg

- Definere egnede skroglinjer basert på hoveddimensjoner, lettskipsvekt og krav til dødvekt.
- Regne skrogmotstand basert på kombinasjon av empiriske formler, CFD beregninger, skalering av modelltestdata og/eller fullskala prøvetursdata for relevante referanser.

Motstand beregnes for en gjennomsnittlig lastekondisjon karakterisert av:

- Full PBE og passasjerkapasitet (men ingen vogntog).
- Mannskap og forråd.
- Samtlige tanker halvfulle.

Det legges også til en %-verdi som margin på motstand for å ta hensyn til vær, groe, ugunstige autopilot kurskorreksjoner og liknende. Denne kan endres i det digitale verktøyet men er i utgangspunktet satt til 5%. Det kan være naturlig å variere sjømargin avhengig av hvor værhardt et gitt samband er. Verdi som angitt ovenfor anses representativt for typisk fartsområde 2 samband.

Det antas en skrogruhet på 120 µm som er gjeldende for skrog bygget i stål og aluminium, med mindre silikonbunnstoff eller tilsvarende anvendes.

Enkeltskrog

Skrogmotstand for enkeltskrog beregnes etter Holtrops metode. Input data til beregningen er i form av våt overflate, koeffisienter m.m. som hentes fra utarbeidde skroglinjer. I tillegg benyttes skalering av tilgjengelige modelltest resultater og eventuelle fullskaladata.

Det beregnes tilleggsmotstand for slingrekjøler.

LMG Marin har opparbeidet en database på enkeltskrog pendelferger basert på modelltester hvor resultater kan skaleres til ulike størrelser og/eller benyttes til å sammenligne mot resultater fra beregninger etter nevnte Holtrops metode. En anser derfor motstandsdata for enkeltskrog pendelferger som denne rapporten er basert på å ha lav usikkerhet.

Katamaran

For katamaran beregnes motstand i henhold til Wigley for restmostand og ITTC for friksjonsmotstand.

CFD analyse av eneltskrog og katamaran av lik størrelse har vært utført for å kartlegge forskjell i motstand. Videre er anvendt empirisk beregningsmetode sammenlignet og funnet overensstemmende med relevante Marintek prediksjoner av katamaran pendelferger bygget i stål³³. Men LMG Marin sitter ikke på en modelltest database for katamaran pendelferger, og resultater for denne skrogtype som presenteres i denne rapport anses derfor å ha høyere usikkerhet sammenlignet med enkeltskrogkonsept.

6.2.2 FREMDRIFT

All fremdrift baserer seg på at det benyttes rorpropellere. Det benyttes en rorpropeller i hver ende som er effektivt integrert i skroget uten oppbygninger («vorter») som danner tilleggsmotstand.

³³ Marintek rapportene ID 530363.00.01 «Speed prognosis DCAT 50G» og ID 530363.00.02 «Speed prognosis DCAT 125G» begge datert juni 2004.

For samtlige alternativer legger en opp til turtallsvariasjon av rorpropeller. Normalt er propell med fast stigning, men selv om variabel stigning benyttes legger en i denne studien opp til at belastning varierer etter propellkurve³⁴. Det er antatt 50/50% lastfordeling mellom forre og aktre rorpropell. En fordeling med høyere last på aktre enhet kan vise seg mer effektiv men dette vil i så tilfelle være likt for alle alternativene og dermed ikke slå ut på sammenligningen³⁵. Se for øvrig kapittel 5.5 angående spesielt høyeffektive propulsorer.

Propulsjonsvirkningsgrad

Det benyttes typisk propulsjonsdata for åpent vann som opplyst av leverandører kombinert med skroginteraksjonskoeffisienter basert på erfaring fra propulsjon modelltester og dialog med leverandører. På denne måten fremkommer propulsjonsvirkningsgrad. Propulsjonsvirkningsgrad er i denne studien antatt å være konstant og ikke variere med belastning/fart og operasjonsmode.

Mekaniske tap³⁶

Mekanisk tap aktuelle for konseptene studert er i rorpropellens innebygde reduksjonsgir og er antatt å være konstant på 5%. Det er da lagt til grunn en rorpropell med såkalt Z-drev (det vil si 2 stykk 90° vinkelgir. Dette er en ikke-konservativ betraktning da mekanisk tap normalt vil øke i %-verdi ved redusert belastning (varierer typisk fra 5% ved fullt turtall til 10% ved tomgangsturtall).

Elektriske tap³⁷

Elektriske tap antas også til å være konstant med gjennomsnittsverdi for typisk ferge driftsprofil, men varierer med type konfigurasjon som følger:

Gass/dieselelektrisk AC-løsning med frekvensomforming:	13,3%
Batterihibrid DC-løsning med kraft fra generator (via batteri):	12,4%
Ren batteri eller hybrid plugg-inn med kraft fra batteri:	8,7%

De ulike tapsleddene som benyttes er:

Fra landstrøm via landstrømstilkopling til tavle:	4,0%
Fra tavle til batteri:	1,1%
Fra batteri til tavle:	2,1%
Fra generatormotor til tavle:	6,9%
Fra tavle til levert mekanisk energi fra frekvensstyrt motor:	5,9%
Fra tavle til hotell og hjelpesystemer:	3,0%

Unntak gjelder for spesielle tiltak som for eksempel permanentmagnetmotorer som beskrevet i kapittel 4.4.2.

³⁴ Det vil si operasjon med vripropell som om den hadde fast stigning. Eventuell fordel med vripropell ville være under manøvrering og/eller akselerasjon hvor vridning kan effektivisere tidsbruk, men dette tas ikke høyde for i dette studiet.

³⁵ Spesielt for ferger som opererer med lavt effektforbruk i normal transitt i forhold til installert motorkraft kan operasjon med opp til 100% belastning på aktre enhet vise seg effektivt.

³⁶ Mekaniske tap er typisk friksjon mellom tannhjul i et girsystem eller motstand for et tannhjul som er neddykket i smøreolje, men kan også være mekanisk dreven pumper for oljesmørning eller liknende.

³⁷ Elektrisk tap varierer i virkeligheten med lastuttak men typiske gjennomsnittsverdier benyttes her. Systemleverandører markedsfører ofte langt lavere tap men opplyser ofte data basert på optimalt driftspunkt for alle elektriske komponenter i systemet (hvilket ikke forekommer i normal driftsmode). Dog kan elektrisk tap variere en god del mellom ulike konsepter og leverandører.

6.2.3 ENERGIUTNYTTELSE

Energiforbruk som presentert i denne studien refererer seg til det opprinnelige energiinnholdet i brennstoffet som anvendes. Faktisk forbrukt energi beregnes dermed med basis i termisk energiinnhold i mengde drivstoff forbrukt. Følgende energiinnhold/nedre brennverdi er antatt for de ulike alternativene:

Marin gassolje (diesel)	:	42,7 MJ/kg
LNG (naturgass)	:	48,9 MJ/kg
Hydrogen	:	118,9 MJ/kg

For biodiesel og biogass benyttes i studiet samme energiinnhold kombinert med samme spesifikke forbruk som fossilt brennstoff. Biogass som LNG har normalt samme energiinnhold som fossil naturgass. Biodiesel har gjerne 5 – 10% lavere energitetthet sammenlignet med marin gassolje, men vil samtidig ha et høyere spesifikt brennstoff forbruk for å produsere samme effekt. I mangel av spesifikke data for biodiesel vurderes nevnte fremgangsmåte å ha akseptabel nøyaktighet.

For energi fra el-nettet tas ikke hensyn til produksjonstap fra kilden. Det eneste som inkluderes er overføringstap for lading av batterier om bord i fergen som er antatt til 4%.

6.3 DRIFTSPROFIL

Driftsprofil som antatt for en overfart består av følgende moder:

- Manøvrering fra kai
- Akselerasjon (med eventuell overgangs transittperiode med redusert fart)
- Transitt
- Retardasjon (med eventuell overgangs transittperiode med redusert fart)
- Manøvrering til kai
- Kailigge

Tid for manøvrering fra og til kai varierer som funksjon av fergestørrelse, med en minimum totaltid (manøvrering fra kai + manøvrering til kai) på 1 minutt for 20 PBE ferge og opp til 3 minutter for 290 PBE ferge. Det antas i disse manøvrermødene en konstant effekt på 50% av propulsjonseffekt i transitt fart. Tilbakelagt distanse fra og til kai i disse modene antas ubetydelig.

Akselerasjonstid og tilhørende tilbakelagt distanse baseres på referanser, analyse og/eller beregninger utført av propulsor leverandør samt tilgjengelig propulsjonseffekt på 120% av effektbehov under transitt. Det antas en starthastighet på 1 knop. Akselerasjon på 0,05 m/s² antas for en tradisjonell ferge. For ferge i aluminium oppnås økt akselerasjon på 0,07 m/s² basert på en masse x akselerasjon betraktning, og tid/tilbakelagt distanse reduseres tilsvarende, se tabell 6-1. Samme prinsipp og verdi brukes i retardasjonsmode, men med en propulsjonseffekt på 25% av effektbehov under transitt.

Ferges transitthastighet	Tilbakelagt distanse i akselerasjon	
	Stål (0,05 m/s ²)	Alu (0,07 m/s ²)
9 knop	208 meter	148 meter
12 knop	376 meter	272 meter
15 knop	590 meter	425 meter
18 knop	853 meter	600 meter

Tabell 6-1: Typisk akselerasjonsdistanse, enkeltskrog stål og aluminium

En distanse med en viss redusert fart kan og spesifiseres. Denne distansen kan være en sum av flere kortere overgangsperioder etter akselerasjon eller retardasjonsmoder. Tilhørende propulsjonseffekt finnes ut fra motstand- og fremdriftsberegninger som beskrevet i kapittel 6.2.

Tilgjengelig tid til transitt defineres ved å trekke tidsbruk til samtlige andre moder fra total tilgjengelig tid mellom avganger. Videre finnes transittert distanse ved å trekke fra distanser utført i akselerasjon og retardasjon. Ut i fra dette finnes nødvendig transitthastighet, og tilhørende propulsjonseffekt finnes ut fra motstand- og fremdriftsberegninger som beskrevet i kapittel 6.2.

Når fergen ligger til kai antas at propulsjon benyttes til å holde fergen mot kai med en maskinkraft som er funksjon av ferge størrelse. Det antas som utgangspunkt ikke bruk av landstrøm ved normal kortvarig kailigge. Tidsbruk ved kai defineres som nødvendig tid til lossing og lasting (se kapittel 6.6) pluss en margin slik at total tidsbruk ved kai stemmer med tidtabell.

Last til hjelpesystemer og hotell antas å være konstant over hele syklusen for normal operasjon (unntatt landligge over natten).

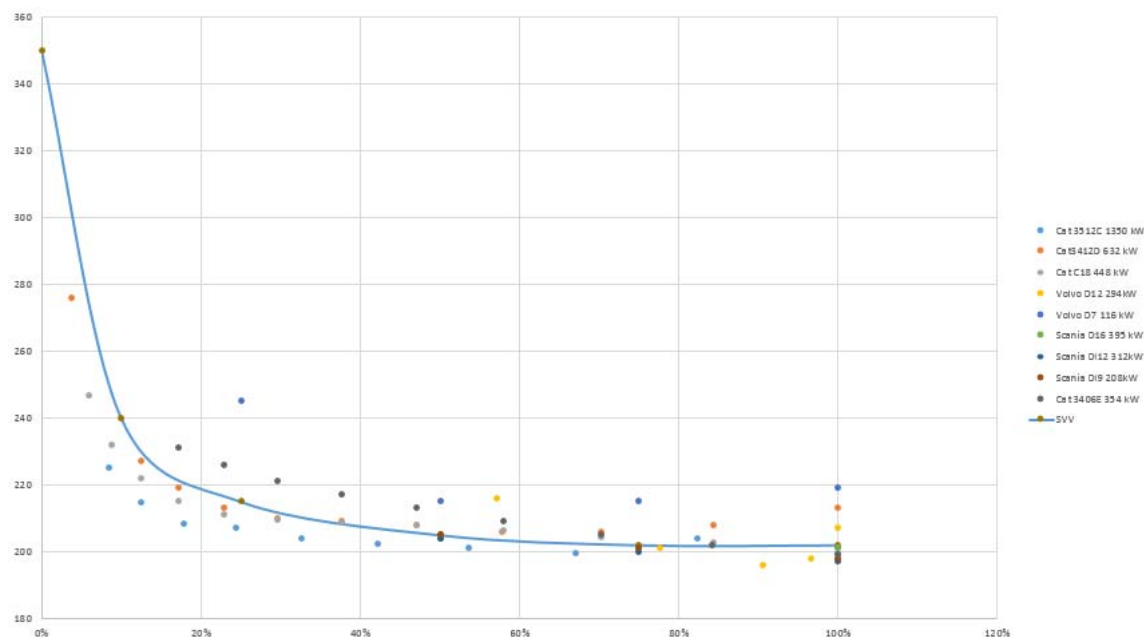
Eventuell gass/dieselfyrt kjel for oppvarming kombinert med landstrøm kan velges av brukeren. Elektrisk kraftbehov til hjelpesystemer og hotell er antatt å være 30% av normal belastning ved landligge over 30 minutters varighet.

6.4 SPESIFIKT BRENNSTOFF FORBRUK

6.4.1 FREMDRIFT

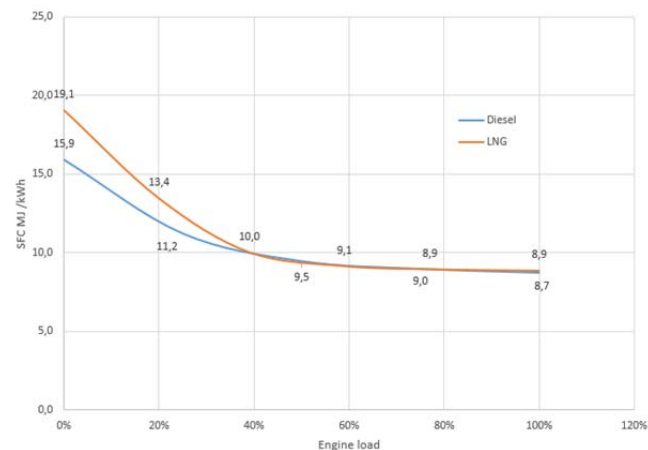
Spesifikt brennstofforbruk for gass- og dieselmotorer baseres på typisk data gitt fra relevante motorleverandører. Det tas utgangspunkt i kurve over forbruk som funksjon av effektuttak på motor, og det legges til 3% for å ta hensyn til mekanisk drevne pumper m.m. For mekanisk drift benyttes kurve for spesifikt brennstofforbruk basert på variabelt motorturtall etter en propellerkurve ($P \sim n^3$) mens en for elektrisk fremdrift baserer en seg på lastvariasjon ved konstant turtall. For hybridløsninger baserer en seg på konstant spesifikt brennstofforbruk ved optimalt driftspunkt for motoren.

Figur 6-1 viser benyttet kurve for dieselmotorer sammen med data hentet fra ulike leverandørers dataark.



Figur 6-1: Anvendt spesifikt brennstoff forbruk for dieselmotorer sammen med typisk forbruk for ulike motortyper

Det benyttes for enkelhets skyld kun to kurver for spesifikt brennstoff forbruk i dette studiet, en for dieselmotorer og en for gassmotorer. En antar dermed at spesifikt forbruk ikke varierer med motors størrelse eller om det er elektrisk eller mekanisk drift. Benyttet data er vist i figur 6-2.



Figur 6-2: Anvendt spesifikt forbruk for gass- og dieselmotor

Det legges på en antatt faktor på 20% for motorbelastninger av dynamisk natur da maskineri i slike situasjoner forbruker mer sammenlignet med statisk last. Dette er relevant for manøvrering, akselerasjon og retardasjon av fergen om det benyttes mekanisk eller tradisjonell elektrisk fremdrift. For hybridkonsepter «skjermes» motoren på en slik måte at dette merforbruket ikke blir relevant (såkalt «peak shaving» effekt – se også kapittel 6.11).

6.4.2 HJELPEMASKINER

Mindre hjelpemotorer benyttes til elektrisk kraftproduksjon for dieselmekanisk løsning. Dette er relativt små hurtigløpende dieselmotorer som antas operert med konstant turtall og for dette studiet også med konstant last. Spesifikt forbruk er normalt høyere enn for større fremdriftsmotorer, og er satt til +10%. Samme tillegg på 3% for motorens mekanisk drevne pumper legges til.

6.4.3 KJEL

Generelt anses en dieselfyrt kjel som redundant løsning til varmegjennvinning fra motors kjølevann som de fleste ferger er utrustet med. Slik varmegjennvinning er avhengig av at motor

som varme hentes fra er aktiv og går med stor nok belastning³⁸. Det er derfor behov for dieselfyrt kjel når fergen ligger i lengre perioder til kai. I tillegg observerer en at noen ferger i normal rute går med såpass lav belastning på hovedmotorer at det ikke er tilgjengelig varme fra kjølevann for gjennvinning. I slike tilfeller kan mannskap se seg nødt til å kjøre dieselfyrt kjel kontinuerlig.

Dieselfyrt kjel ligger som tidligere nevnt inne som standard varmemprodusent i beregningene når fergen ligger til kai for konseptene dieselmekanisk, gass elektrisk og hybridløsninger som ikke har plugg-inn funksjon. Oppvarmingsbehov er da satt til 120% av det elektriske oppvarmingsbehovet som vist i kapittel 6.13.2 og benyttet brennstofforbruk er 120 g/kWt.

Dieselfyrt kjel blir ikke benyttet utover landligge i dette studiet.

6.5 LETTSKIP OG DØDVEKT

6.5.1 LETTSKIP

Lettskip er fergens vekt uten last, forråd og drivstoff. For ferger i databasen basert på referanser finnes målte vekter. For resterende konsept i databasen er lettskipsvekt beregnet ved hjelp av 3D geometrimodell for skrogmaterial. Utrustningsvekt er beregnet med koeffisienter basert på regresjonsanalyse fra bygde ferger. Utrustningsvekt for passasjerområde er en funksjon av en koeffisient ganget med antall kvadratmeter for passasjerareal (som er selv funksjon av antall passasjerer). Maskineri og relaterte systemers vekt er funksjon av installert effekt ganget en koeffisient osv.

6.5.2 DØDVEKT/NYTTTELAST

Det benyttes en gjennomsnittlig dødvekt i beregningene gitt som fergen med full PBE og passasjerkapasitet, mannskap med forråd samt halvfulle tanker med drivstoff, ferskvann, oljer og grå/svartvann.

6.6 BRUKT TID I HAVN

Brukt tid til kai baseres på nødvendig tid for å losse og laste om bord kjøretøy og vil variere fra anløp til anløp da antall kjøretøy varierer over døgnet og over uken (se kapittel 6.9). Det antas at hele fergen losses før lasting igangsettes. Kjøretøy losses med en hastighet av 40 PBE/minutt og lastes om bord igjen med en hastighet av 20 PBE/minutt. I tillegg inkluderes tid til klargjøring for lossing og for avgang innunder manøvrering (løfte/stenge bom med mer).

I digitalt verktøy kan bruker legge til eller trekke fra endring på $\pm 20\%$ i medgått tid til lasting og lossing av kjøretøy for å ta hensyn til spesielt effektive eller ineffektive forhold.

6.7 BRUK AV LANDSTRØM

6.7.1 NORMAL LANDSTRØM

I utgangspunktet blir landstrøm kun brukt når fergen ligger til kai over 30 minutter, inkludert natt. Dette gjelder konsept uten aktiv lading av batteri fra el-nett. Landstrøm er da begrenset til 2 x 125A, 230V, 50 Hz, 3-f (slik begrensning er ikke inkorporert i digitalt verktøy). Denne kapasitet er

³⁸ Ofte er det ingen varmeuttak tilgjengelig ved lavlast

noe lav i forhold til behovet og mannskap må normalt slå av en rekke forbrukere for å gå på landstrøm. I tillegg er det som tidligere nevnt normalt å supplere varmeproduksjon med dieselfyrt kjel.

6.7.2 HØYKAPASITET LANDSTRØM

For plugg-inn konsepter som benytter el-nettet til aktiv lading av batterier om bord i fergen er det behov for store kapasiteter og det er behov for lading hver gang fergen ligger til kai. For å oppnå tilstrekkelig landstrømkapasitet kan en enten ha tilstrekkelig kapasitet direkte fra el-nettet eller en kan installere bufferbatterier på kai som gradvis lades opp mens fergen er på en rundtur, og hurtigoverfører når den kommer til kai. En vil i dette studiet ikke gå videre inn på hvordan høypasitet landstrøm tilrettelegges.

For konseptet som benytter høypasitet lading i havn er det også behov for en effektiv overføringsenhet. Her finnes flere mulige løsninger som en ikke går inn på i detalj i dette studiet (eksempelvis spesialplugg, pantografkonsept og induksjonsoverføring). Det legges dog opp til et visst tidsforbruk for oppkopling, opp/nedramping av last og utkopling, og det er kun gjenværende tid til kai som blir effektiv ladetid.

6.8 BRUK AV PROPULSJON I HAVN

Normalt benytter fergen propulsjon til å holde seg i posisjon inntil kai. I denne studien antas at det medgår 10% av transitt effektbehov til dette formål når fergen ligger til kai i opp til 30 minutters varighet. Ved lengre varighet antar en at fergen fortøyes.

Dersom det installeres automatisk fortøyingssystem som holder fergen i posisjon hver gang den kommer til kai er det ikke behov for slik propulsjonskraft.

6.9 TRAFIKKVARIASJON OVER DØGNET OG UKEN

Det angis av bruker i digitalt verktøy en total trafikkapasitet på sambandet som forventes i form av maksimal daglig gjennomsnittlige PBE ekvivalenter. Verktøyet blir for komplekst om det skal ta høyde for ulike kjøretøy så her må bruker vurdere en PBE ekvivalent for vogntog og andre typer kjøretøy etter hvilke plass de opptar på dekk.

Videre har en med utgangspunkt i typisk representativt samband kjent %-vis variasjon av trafikk over døgnet laget en trafikkvariasjon (denne kan justeres av bruker). Bruker kan også summere opp flere døgn med ulike trafikkvariasjon og dermed produsere resultat per uke.

Tid ved kai avhenger som tidligere nevnt av antall kjøretøy og det vil derfor beregnes lavere energiforbruk i rolige perioder når fergens transittthastighet kan holdes nede på et minimum. Dette gjelder ikke nødvendigvis for batteri- og plugg-inn hybridferger.

6.10 UTNYTTELSE OG LADING AV BATTERI

For å oppnå akseptabel levetid skal ikke et batteri brukes for hardt (gjelder lading og uttømming). Total kapasitet gitt i kWt er ikke å forstå som tilgjengelig kapasitet. I dette studiet vurderes laderate på C1 og C2 som tilsvarer fullading innen henholdsvis 60 og 30 minutter. Eksempler i tabell 6-1 nedenfor illustrerer alternative kombinasjoner av landstrøm ladeeffekt og fergens batterikapasitet for et gitt behov per overfart på 100 kWt.

Energibehov per tur	100 kWt	100 kWt	100 kWt	100 kWt
Ladetid, effektiv	10 min	10 min	5 min	5 min
Laderate	C1	C2	C1	C2
Ladeeffekt	600 kW	600 kW	1200 kW	1200 kW
Batterikapasitet	600 kWt	300 kWt	1200 kWt	600 kWt
Batteri utnyttelse	73 – 90%	57 – 90%	82 – 90%	73 – 90%

Tabell 6-1: Sammenheng mellom batteri utnyttelse, ladetid og laderate (maks SoC benyttet er 90%)

En ønsker gjerne å lade med C1 for å sikre lang levetid³⁹, men en observerer at dette gir dobbelt så store batterier i fergen i forhold til C2 lading. Da batterier er svært kostbare er det fristene å basere seg på C2 nivå, men da må en samtidig forsikre seg om at batteriet har god kjøling for å unngå ugunstig varmedannelse under ladeprosessen. Vannkjølte batterier kan i så tilfelle være bedre egnet enn luftkjøling. Endelig valg av laderate, ladeeffekt og batterikapasitet må gjøres med basis i et totalt kostnadsbilde inkludert eventuell utskifting av batterier gjennom fergens eller prosjektets levetid.

6.11 EFFEKT AV «PEAK SHAVING»

Ved bruk av en batteri-hybrid løsning oppnås energieffektivisering selv om en ikke utnytter el-kraft fra nettet. Besparselsen ligger i at batteriet tar all dynamisk last og gass/dieselmotor får gå med helt jevn last. I en slik løsning vil en ikke få det dynamiske merforbruket som en mekanisk eller elektrisk løsning ellers ville erfare⁴⁰. Den såkalte «peak shaving» effekten består dermed i at motor leverer effekt til forutsigbart forbruk etter motorleverandørs kurve fra dataark. Denne effekten er tatt høyde for i alle gass/diesel hybridløsninger som vurderes. Se også kapittel 4.3.3 og 6.4.1.

Batteri-hybrid løsninger erfarer også energieffektivisering i form av generatormotor på konstant og optimalt driftspunkt, sammenlignet med variable driftspunkt (og spesielt ineffektiv lavlastkjøring) for mekanisk og konvensjonell elektrisk fremdrift. Se også kapittel 4.3.3.

For å oppnå positiv effekt sammenlignet med en dieselmekanisk løsning må nevnte fordeler overgå ulemper med elektrisk tap.

6.12 BEREGNING AV HYDROGEN HYBRIDKONSEPT

Se vedlegg A.

6.13 GENERELLE TILTAK

6.13.1 TILTAK OG «FLASKEHALSER» FOR BRUKT TID I HAVN

Bilbro

Dersom bilbro ikke har samme bredde som baugrampe og/eller fergen ikke er i stand til å posisjonere seg senter-til-senter mot bilbro vil ikke lossing og lasting av kjøretøy kunne utføres så effektivt som forutsatt. Det legges derfor inn en mulighet for bruker å angi «flaskehals» i systemet som %-vis redusert effektivitet. Typisk fås en liten reduksjon dersom det kun forventes redusert fart på bilene, mens effektivitet reduseres til det halve om en må gå fra 2 til en rekke som kjører

³⁹ Med C1 laderate og bruk av batteriets kapasitet (SoC – State of Charge) innenfor 30% variasjon og ikke under 60% oppnås akseptabel batteri levetid opp mot 10 år

⁴⁰ Unngår sort røyk som typisk observeres ved akselerasjon av en ferge

om bord/i land samtidig. Merk at digitalt verktøy ikke tar hensyn til av/ombordkjøring med flere rekker i parallell.

Ilandkjøring

Dersom det finnes obstruksjoner på land som hindrer effektiv ilandkjøring må dette tas hensyn til i beregningene. Dersom en legger opp til ilandkjøring av to rekker samtidig kreves to felt på land i tilstrekkelig lengde til å tømme hele fergen. Dersom det finnes veikryss eller rundkjøringer nær fergekai vil disse også hindre avkjøring. Bruker kan legge inn en %-vis reduksjon av losse effektivitet basert på karakteristika for fergekai som vurderes.

Feltbredder

Mulig fremtidig oppgradering av digitalt verktøy: Det opplyses antall feltbredder på fergens dekk, over baugrampe og bilbro. Det opplyses også antall rekker som kjører parallelt over bilbro under lossing/lasting. Normalt er det flere feltbredder inne på fergedekket enn det er over bilbro. Dersom forholdene tillater det kan bruker øke bredde på baugrampe og bilbro tilsvarende antall feltbredder på bildekk, samtidig øke antall rekker som kjører parallelt og undersøke effekten av dette.

6.13.2 TILTAK FOR REDUSERT ENERGIFORBRUK TIL HJELPESYSTEMER OG HOTELL

Energiforbruk til hjelpesystemer og hotell for en tradisjonell ferge dekkes av om bord dieselgenerator og anslås etter erfaringsdata. Det benyttes i normal drift en fordeling inn i følgende kategorier:

Oppvarming (elektrisk)	: 19%
Belysning	: 9%
Motordrift	: 46%
Annet	: 26%

Ved lengre landligge (over natten) er elektrisk forbruk til hjelpesystemer og hotell dekket av landstrøm og er i størrelsesorden 30% av forbruk i normal drift. Fordeling av dette landligge forbruket er som følger:

Oppvarming (elektrisk)	: 24%
Belysning	: 21%
Motordrift	: 29%
Annet	: 26%

Oppvarming identifisert ovenfor gjelder kun elektrisk oppvarming. I tillegg kommer restvarme fra maskineri og diesel/gassfyrt kjel. Belysning gjelder utvendig og innvendig. Motordrift gjelder alle pumper og vifter som drives av en elektromotor. «Annet» er en samlepost for resterende forbrukere som batteriladere, strøm til automasjon, underholdningsutstyr, bysseutstyr med mer.

Energiforbruket kan reduseres ved implementering av energieffektiviserende tiltak. Effekt av slike tiltak beregnes som følger:

LED belysning: 80% reduksjon av «belysning».

Motor frekvensstyring: 25% reduksjon av «motordrift».

Økt termisk isolasjon: 20% reduksjon av oppvarmingsbehov. Benyttes eksoskjel vil

økt termisk isolasjon ha liten effekt siden systemet har overskudd av varmeenergi, men for en ren batteriferge vil dette ha full effekt.

Termostank: Erstatte energiforbruket i dieselfyrt kjel ved landligge over natten ved at overskuddsvarme fra driftsperioden lagres til bruk om natten.

Eksoskjel: En eksoskjel gjenvinner varme fra eksosen til diesel- eller gassmotorene. Kan i teorien erstatte 60 - 80% av oppvarmingsbehovet. Kombinert med termostank kan opp mot 100% av oppvarmingsbehovet om natten dekkes av eksoskjel.

En eksoskjel kan også kombineres med systemer for lavtemperatur elektrisitetsproduksjon. Det finnes slike systemer som kan omforme 10 - 15% av tilgjengelig eksosvarme til elkraft. Det er rimelig å anta at 30% av totalt tilført energi til en ferje er tilgjengelig for slik eksosgjenvinning slik at potensialet er 3 - 5% av tilført energi.

Ventilasjonsrotor: Effektivt ventilasjonssystem for innredning inkludert roterende entalpi hjul antas å gi 30% reduksjon av elektrisk oppvarmingsbehov.

ENØK styring: 5 - 10% reduksjon av energibehov for hjelpesystemer og hotell totalt

Elektrisk RORO utstyr: Dette utstyret konsumerer rundt 35% av «motordrift» under manøvrering og til kai og mesteparten av energien går til å holde hydraulikksystemet standby og klart til bruk. Med elektriske aktuatorer støttet av batteri erstattes hydraulikk og standby energiforbruk elimineres. Intet energiforbruk er da nødvendig under manøvrering (forberedelse) og 50% antas spart til kai.

Fjerne lugarer: Her finnes besparelse i form av redusert motstand med lavere vekt og redusert vindmotstand. I tillegg antas 10% reduksjon av energiforbruk til hjelpesystemer og hotell.

Økt landstrømkapasitet: Erstatte dieselfyrt kjel med elektrisk kjel eller annen elektrisk oppvarmingsmetode basert på el-nettet som kilde.

Lavenergi bysse/kiosk utstyr: Benytte lavenergi kjøkkenutstyr. Man kan forvente 10% reduksjon av energiforbruk for relevante enheter, som utgjør 15% av «andre» forbrukere. Totalt 1,5% reduksjon av «andre» forbrukere.

Fjerne kiosk/kafeteria: Dersom en fjerner kiosk/kafeteria så vil det medføre antatte 15% reduksjon av «andre» forbrukere.

Hvitevarer på spillvarme: Benytte overskuddsenergi fra motorkjølingen og evt. eksoskjel til forvarming av forbruksvann til bysse/kafeteria/mannskapsområder, etc. Potensial for 25% reduksjon i elkraftforbruk for relevante enheter. Totalt 3,75% reduksjon av «andre» forbrukere (ref. vedlegg C).

6.13.3 TILTAK FOR REDUSERT ENERGIFORBRUK TIL PROPULSJON

Effekt av energieffektiviserende tiltak for direkte reduksjon av medgått propulsjonseffekt beregnes som følger:

Silikon bunnstoff : Overflateruhet av skrog redusert fra 120 til 70 μm .

Automatisk fortøyning : 10% av transitt propulsjonseffekt.

Permanentmagnet motor: Gjennomsnittlig virkningsgrad for elektromotor økes fra 90 til 95%.

Høyeffektiv propulsor : Frivirkningsgrad, $\eta_0 = 0,7$.

Effekt av silikon bunnstoff finnes da ved beregning av skrogmotstand basert på redusert skrogruhet.

Effekt av permanentmagnet motor er kun aktuell for elektrisk drift og beregnes ut i fra reduserte elektriske tap i systemet.

6.13.4 TILTAK FOR REDUSERT UTSLIPP

NO_x avgassrensing beregnes ut i fra hurtigløpende IMO Tier II sertifisert dieselmotor. En slik motor har typisk et gjennomsnittlig utslipp på 7,0 gNO_x/kWt (varierer noe fra elektrisk til mekanisk drift og mellom ulike motortyper). Avgassrensing ved bruk av katalysator avhenger av driftsprofil og mengde urea tilført. I dette studiet har en antatt følgende:

Mekanisk & elektrisk drift: NO_x redusert fra 7,0 til 3,0 gNO_x/kWt

Diesel/batteri hybriddrift: NO_x redusert fra 7,0 til 1,5 gNO_x/kWt

Urea forbruk regnes som 5% av tilhørende motors dieselforbruk.

6.14 INVESTERINGSKOSTNADER

Det er forbundet betydelig usikkerhet til kostnadsanslagene gitt i påfølgende underkapitler, og de benyttes av den grunn kun til å presentere relative kostander for anskaffelse + 10 års energiforbruk til sammenligning konseptene imellom.

6.14.1 TRADISJONELLE FERGER

Pris på en ferge vil avhenge av en rekke faktorer som hvor den bygges, når den bygges og liknende.⁴¹ I tabell 6-2 nedenfor er typiske anskaffelseskostnader angitt for tradisjonelle enkeltskrog pendelferger i stål med moderat fartspotensial.

Ferge størrelse, PBE	Antatt investeringskostnad, 10 ⁶ NOK		
	Diesel- mekanisk	Diesel- elektrisk	Gass- elektrisk
20	40	50	65
30	50	60	76
40	60	70	87
50	75	85	103
70	90	100	119
90	120	130	150
125	185	195	217
165	260	270	295
212	300	310	337
290	340	350	380

Tabell 6-2: Antatt investeringskostnad for ulike typer enkeltskrog stålferger

Anslåtte anskaffelseskostnader for andre alternativer hvor en ikke har tilgjengelig erfaringstall gjøres etter følgende prinsipp:

6.14.2 HYBRIDFERGER

Det tas utgangspunkt i pris for diesel- eller gass-elektrisk avhengig av om en ser på gass- eller diesel hybrid løsning. Deretter legges det til en pris på 10.000 NOK/kWt batteri.

I tillegg kommer kostnader på høykapasitet hurtigladeoppkopling dersom en legger opp til plugg-inn lading av batteri fra nett som definert i 6.14.9.

6.14.3 BATTERIFERGE

Det tas utgangspunkt i en dieselelektrisk ferge. Deretter gjøres et fratrekk på 2200 NOK per installert kW maskineri. Dermed oppnås fratrekk for dieselmaskineriet. Deretter legges det til en pris på 10.000 NOK/kWt batteri.

I tillegg kommer kostnader på høykapasitet hurtigladeoppkopling som definert i 6.14.9.

6.14.4 HYDROGENFERGE

For hydrogenferge benyttes følgende kostandberegning fremgangsmetode:

⁴¹ Pris på ferge varierer erfaringsvis stort mellom norske, polske og tyrkiske verft (som er mest relevante lokasjoner for fergebygging), og reder må se pris opp mot kvalitet og leveringstid når valget gjøres.

- En tar utgangspunkt i dieselelektrisk ferge.
- Det trekkes fra kostander for dieselgeneratorer på 5.000 NOK/kW.
- Det legges til kostander for hydrogen brenselceller på 14.000 NOK/kW (opplyst av Prototech).
- Det legges til kostnader for hydrogenlager trykktanker ved skalering relativt til kapasitet basert på eksempel i tabell 6-3 nedenfor og en installert kapasitet på ett dagsbehov med 20% margin.
- Det legges til kostander for redundant «take-me-home» batterikapasitet tilsvarende transittering på 5 nautiske mil.
- Det legges til antatte brenselcelle og hydrogenlager integrasjonskostnader på 20% av utstyrsverdier.

Leverandør	Hexagon Tuffshell
Trykk	500 bar
Vekt, lagret hydrogen	17 kg
Volum, lagret hydrogen	531 liter
Lagringskapasitet, vektprosent	6,1%
Tank egenvekt	275 kg
Volum per tankgruppe	1032 liter
Pris	11.700 USD

Tabell 6-3: Data for hydrogen trykktank (informasjon fra CMR Prototech)

Brenselcelle og hydrogenlager integrasjonskostnader antas å inkludere:

- Hydrogen piping og bunkringsløsning.
- Gassdeteksjon og nedstengningssystemer.
- Varmtvann energigjenvinning fra brenselcelle.
- Elektrisitet konvertering fra brenselcelle til skipsnett.
- EX sikkert utstyr, utrustning, ventilasjon etc.

Siden det enda ikke har vært realisert en hydrogenferge er kostnadsestimering høyst usikkert, spesielt da det er knytt usikkerhet til omfang av sikkerhetstiltak som vil kreves fra myndigheter.

6.14.5 KATAMARAN

Det tas utgangspunkt i pris for enkeltskrogsferge av samme kapasitet og skrogmaterial. Pris justeres som følger:

- Pris på skrog økes med tilleggsvekt sammenlignet med tilsvarende enkeltskrogferge multiplisert med pris per ferdig bearbeidet skrogmaterial (som antas 30.000 og 150.000 NOK/tonn for henholdsvis stål og aluminium).
- Pris på maskineri endres med differanse i installert maskinkraft multiplisert med 5.000 NOK/kW for dieseldrift og 8.000 NOK/kW gassdrift.

Det antas her samme antall motorer og propulsjonsenheter installert i enkeltskrog og katamaran alternativene.

6.14.6 ALUMINIUMSKROG

Det tas utgangspunkt i stålvekt for konvensjonell ferge og gjøres fratrekk på 30.000 NOK per tonn stål, en pris som inkluderer bearbeiding og materialpris. Deretter legges til aluminiumsvekt

multiplisert med 150.000 NOK per tonn aluminium. En observerer at aluminium er dyrere både på grunn av høyere materialpris og høyere bearbeidingskostand. Dog kompenseres dette delvis av lavere totalvekt.

Pris på maskineri endres med differanse i installert maskinkraft multiplisert med 5.000 NOK/kW for dieseldrift og 8.000 NOK/kW gassdrift.

6.14.7 HØYHASTIGHETSFERGE

For ferge med spesielt høy hastighet legges på en kostand på 20%.

6.14.8 PRIS PER STØRRELSE FERGE

Dersom pris på ferge skal justeres mellom to kjente priser benyttes gjennomsnittlig pris per PBE som utgangspunkt.

6.14.9 LANDSTRØM HØYKAPASITET

For landstrøm plugg-inn høykapasitet antas i prisingssammenheng bruk av buffer batterier (alternativ med økt nettkapasitet er ikke mulig å beregne på generelt basis). Kostnad beregnes som 2 x 10.000 NOK/kWt pluss kostand på 20 millioner NOK for pantografer eller annen hurtigkopling (inkludert tilkopling på fergen) pluss installasjonskostnad på 20%.

6.14.10 GENERELLE TILTAK

Kostnadseffekt av generelle tiltak er ikke implementert i digitalt verktøy grunnet høy usikkerhet i disse kostnadsanslagene. En har heller ikke vært i stand til å anså kostnader for alle tiltak.

Termotank: Kostnad for installasjon av termotank med struktur, isolasjon, rørføring, pumper, varmevekslere, ovner m.m. anslås til 200.000 NOK.

Eksoskjel: Pris for eksoskjel anslås til 400 - 600 NOK per kW for motor den er installert mot.

Gassfyrt kjel: 1.500 - 2.000 NOK/kW med fratrekk på 1.000 NOK/kW for dieselfyrt kjel som erstattes.

Elektrisk kjel: 500 – 800 NOK/kW med fratrekk på 1.000 NOK/kW for dieselfyrt kjel som erstattes. Vil kun fungere dersom tilstrekkelig landstrøm er tilgjengelig og fergen er utstyrt med eksoskjel eller motor med riktig designet motorkjølesystem. Kan også kombineres med termotank.

Lavtemperatur strømproduksjon: ORC-teknologi, Stirlingmotor eller andre typer termiske maskiner for konvertering av varme til elektrisk kraft. Investeringer mellom 10.000 – 20.000 NOK/kW elkraft. Forutsetter eksoskjel.

Katalysator: 350 NOK per kW motor den er koplet opp mot + 6 NOK/kg for urea med et forbruk som er 5% av motors dieselforbruk.

Ventilasjonsrotor: Energieffektivt ventilasjonssystem inkludert roterende entalpi veksler for gjenvinning av varme i utgående luft er antatt å medføre en ekstra kostnad sammenlignet med tradisjonelt ventilasjonssystem på 200.000 NOK

Frekvensstyring elektromotorer: 30.000 + 250 NOK per kW elektromotor som er frekvensstyrt (gyldig for 30 -120 kW motorer). Merk at de fleste motorer til pumper og vifter i en ferge er langt mindre enn dette i størrelse.

LED belysning: TBD NOK/kW med fratrekk på TBD NOK/kW for erstattet konvensjonell belysning.

Automatisk fortøyning: 3.000.000 NOK per sambands installasjon medregnet grensesnitt mot en ferge.

ENØK-styring/energiledelse: 50.000 NOK (Deler av kostnadene kan kvalifisere muligens til støtte fra Enova i driftsfasen).

Silikonbunnsføring: TBD NOK per m² våt overflate.

Økt normal landstrømkapasitet: Kun nødvendig ved fergens liggekai og antatt til 4.000 NOK/kW økt kapasitet (vil kunne variere betydelig avhengig av lokale forhold).

Batterielektrisk RORO utstyr: TBD NOK per ferge med kun baugramper med fratrekk på TBD NOK for erstattet hydraulisk løsning. TBD NOK per ferge med baugramper, visir og dekksluker med fratrekk på TBD NOK for erstattet hydraulisk løsning.

Fjerne mannskapslugarer: 5% reduksjon av anskaffelsespris for ferge.

Permanentmagnet elektromotor: Prisøkning på 1800 NOK/kW sammenlignet med konvensjonell asynkronmotor.

Lavenergi bysse og kioskutstyr: Prisøkning på 50.000 NOK

Fjerne kiosk/kafeteria: Prisreduksjon på 300.000 NOK for kiosk og 1.000.000 NOK for kafeteria. Generelt kan en anta kiosk for ferger under 100 PBE og kafeteria for de over.

Hvitevarer på spillvarme: TBD NOK.

6.15 ENERGIKOSTNADER

Energikostnader varierer betydelig over tid og fra applikasjon til applikasjon. For å få mest mulig korrekte tall bør en derfor undersøke dette spesifikt for hver case som undersøkes.

Følgende energikostnader er antatt og benyttet i denne rapporten:

Diesel, lavsvovel marin gassolje	:	6.550 NOK/tonn
LNG	:	6.300 NOK/tonn
Elektrisitet fra nettet inkludert nettleie:		0,8 NOK/kWt
Biodiesel, B100	:	7.000 NOK/tonn
Biogass	:	12.600 NOK/tonn

Hydrogen : 50.000 NOK/tonn

Pris for biodiesel er for 2-generasjons kvalitet men mulig den burde vært korrigert noe for lavere energiinnhold sammenlignet med konvensjonell gassolje diesel.

For hydrogen baserer en seg på produksjon basert på energi fra el-nettet til 1,0 NOK/kWt samt medgått energi på 50 kWt/kg H₂.

Energikostnader listet ovenfor anvendes kun til å presentere relative kostander for anskaffelse + 10 års energiforbruk til sammenligning konseptene imellom.

7. BRUKERINSTRUKSJON – DIGITALT VERKTØY

7.1 GENERELT

Excel-verktøyet består av åtte Excel ark, som vist nedenfor:

Ferry1	Ferry2	Ferry3	Ferry4	Ferry5	Summary	Export	Advanced Inputs
--------	--------	--------	--------	--------	---------	--------	-----------------

Programet er utviklet for å modellere operasjon av opptil 5 ferger på samme samband. De fem første arkene – «Ferry1» til «Ferry5» - er brukt som input ark for beregninger, hvor fergedata og rutetidener for hver ferge legges inn av brukeren.

I «Advanced Inputs» arket kan en bruker med avansert kunnskap også velge input utenom standardverdier («default values»).

«Summary» arket oppsummerer beregninger for en periode (for eksempel en dag) i form av tabell og graf for fergekombinasjon som er valgt.

«Export» arket kan brukes til å lagre resultatene fra «Summary» arket for å samle resultater over en uke (hvis nødvendig).

Generelt kan alle cellene med lyseblå farge endres av brukeren. Andre cellene er låst.

Cells to be filled by user

7.2 FERGE- OG RUTEDEFINISJON

På hvert ferge inputark – «Ferry1» til «Ferry5» - kan brukeren øverst på venstre side sette in data relatert til samband og fergetype.

Først fylles inn sambands lengde med å overskrive eksisterende verdi (i km).

Total crossing distance (km)	5,8
Select ferry concept:	70 Cata Alu Diesel Elec
Use of electricity from shore in standby?	no
Shore power available (Hybrid) (kW)	0
Percentage of biofuel used (%)	0
Quick shore connection (Hybrid)?	no
Trade area	1
Quality of quay interface (loading /unloading)	Normal
Crossing distance at reduced speed (km)	0
Reduced speed (kts)	0
Time at reduced speed (hh:mm:ss)	00:00:00
Max C-rate (hybrid and pure battery only)	1
Total time (h)	24,53
Stop time (h)	7,0
Operating time (h)	17,53

Deretter velger brukeren fergetype fra menyen. Man kan velge fra en database som består av 236 alternativer.

5,8

70 Cata Alu Diesel Elec

70 Cata Alu Diesel Elec

70 Cata Alu Diesel Hybrid

70 Cata Alu Diesel Mech

70 Cata Alu Fuel_Cell Elec

70 Cata Alu Gas Elec

70 Cata Alu Gas Hybrid

70 Cata Steel Battery Elec

70 Cata Steel Diesel Elec

Normal

Som neste steg må bruker velge om ferge vil utnytte landstrøm når den ligger ved kai (for eksempel om natten men også i driftspauser om dagen). Da antar programmet at hele hjelpesystem og hotellasten kan dekkes av landstrøm. Denne funksjonen vil generelt sett redusere drivstoff forbruk og utslipp.

no

yes

no

Neste input er høykapasitet landstrøm i kW som er tilgjengelig for lading av plugg-inn hybridkonsepter og batteriferge når de ligger ved kai.

Total crossing distance (km)	5,8
Select ferry concept:	70 Cata Alu Diesel Elec
Use of electricity from shore in standby?	no
Shore power available (Hybrid) (kW)	0
Percentage of biofuel used (%)	0
Quick shore connection (Hybrid)?	no
Trade area	1
Quality of quay interface (loading /unloading)	Normal
Crossing distance at reduced speed (km)	0
Reduced speed (kts)	0
Time at reduced speed (hh:mm:ss)	00:00:00
Max C-rate (hybrid and pure battery only)	1
Total time (h)	24,53
Stop time (h)	7,0
Operating time (h)	17,53

Prosent av biodrivstoff i total biodiesel eller biogass kan defineres av brukeren ved å overskrive eksisterende verdi i cellen.

Percentage of biofuel used (%)

0

I det tilfellet man ser på hybridkonsepter, kan type landtilkobling velges. Hvis hurtigkopleing er valgt er tid med landstrøm lik total tid ved kai. Hvis man velger "nei" betraktes ett minutt for å plugge inn og ett minutt for å plugge ut av total tid ved kai.

Quick shore connection (Hybrid)?

yes

Deretter må fartsområde velges fra menyen i henhold til sambandet. Sjømargin som er brukt i beregninger er funksjon av fartsområdet. Sjømargin som definert i «Advanced Input» arket kan endres av brukeren ved behov.

Trade area

2

Effektivitet for lasting og lossing av kjøretøy kan defineres av brukeren som 'lav', 'normal' eller 'høy'. Antall personbiler som vil lastes per minutt for normal effektivitet er definert i «Advanced Input» arket som 40 PBE/minutt for lasting og 20 PBE/minutt for lossing. 20% lavere verdi vil brukes automatisk hvis lav effektivitet er valgt mens 20% høyere verdi vil brukes hvis høy effektivitet er valgt.

Total crossing distance (km)	6.9
Select ferry concept:	70 Mono Steel Diesel Mech
Use of electricity from shore in standby?	yes
Shore power available (Hybrid) (kW)	0
Percentage of biofuel used (%)	0
Quick shore connection (Hybrid)?	no
Trade area	2
Quality of quay interface (loading /unloading)	Normal
Crossing distance at reduced speed (km)	0
Reduced speed (kts)	0
Time at reduced speed (hh:mm:ss)	00:00:00
Max C-rate (hybrid and pure battery only)	1
Total time (h)	24.00
Stop time (h)	7.7
Operating time (h)	16.27

Det er mulig å spesifisere en del av strekningen hvor fergen vill seile med redusert fart. Tid med redusert fart beregnes automatisk basert på den reduserte farten som skrives inn av brukeren.

Crossing distance at reduced speed (km)

2

Reduced speed (kts)

8

Time at reduced speed (hh:mm:ss)

00:08:06

For plugg-inn hybrid- og rene batteriferge kan brukeren definere maksimal laderate, såkalt C-rate. Standard verdi er 1 (for luftkjølte batterier). Det samme gjelder for utlading.

Midt på venstre siden av ferge-arkene er hoved dataene oppsummert.

Maximum ferry capacity (cars)	70
Hull type	Mono
Material	Steel
Car deck arrangement	Single Deck
Propulsion type	Gas Elec
Length over all (m)	87
Beam moulded (m)	13,2
Draft (m)	3
Hotel load reduction in operation (%)	0,0
Hotel load in operation (kW)	127,50
Hotel load reduction in standby (%)	0,0
Hotel load in standby (kW)	38,3
Number of car lanes in width at bow ramp	3
Accommodation area passengers (m2)	300
Accommodation area crew (m2)	145
Max passengers onboard	242

Nederst på venstre siden er relatert til generelle tiltak som kan brukes til å spare energi.

I tilfeller hvor tiltak vil redusere hjelpesystem- og hotell last, prosent reduksjon er vist i grå tekst når tiltak er aktivert ('yes').

Energy saving measures (see report):

Automatic mooring (operation)	no		
Silicon paint (operation)	no		
Thermos tank (standby)	no		
Exhaust boiler (operation)	no	0,0	
Heat recovery ventilation (operation & standby)	yes	1,9	1,9
Electrical actuators (operation)	no	0,0	
Frequency controlled elec. motors (operation & standby)	no	0,0	0,0
LED lighting (operation & standby)	yes	7,2	16,8
Thermal insulation improvement (operation & standby)	no	0,0	0,0
Smart control of elec. consumers (operation & standby)	no	0,0	0,0
Removal of crew quarters (operation & standby)	no	0,0	0,0
Increase normal shore power (standby)	no		
Energy efficient kitchen equipment (operation and standby)	no	0,0	0,0
Reverse heat pump (operation and standby)	no		
Kiosk/cafeteria removal (operation)	yes	10,4	
Gas boiler (standby)	no		

7.3 RUTEPLAN DEFINISJON

For hver ferge må ruteplan defineres av brukeren. Tid settes i blå celler med hh:mm:ss format (h: timer / m: minutter / s: sekunder).

Først må avgangs- og ankomsttider i begge retninger defineres: fra «port 1» til «port 2» og fra «port 2» til «port 1».

Minimum tidsbruk til lossing + lasting beregnes automatisk basert på forutsetninger som definert tidligere.

Total tid ved kai kan ikke være kortere enn lossing + lasting minimum tid.

Det er vanlig at tid ved kaien er konstant for hele eller nesten hele ruteplanen. Denne konstante tiden kan defineres direkte av brukeren her:

Clear extra time

Fill extra time

Total time @ quay :
00:05:30

2 Unloading/Loading time	3 Extra time @ quay	4 Total time @ quay
00:05:15	00:00:15	00:05:30
00:05:15	00:00:15	00:05:30
00:05:15	00:00:15	00:05:30

Med å klikke på «Fill extra time» knappen vil «Extra time @ quay» justeres automatisk for alle linjene slik at lossing / lasting tid + ekstra tid = total bestemt tid ved kai (kolonne 2+3 = kolonne 4).

«Extra time @ quay» kan videre justeres manuelt hvis total tid ved kai ikke er konstant over hele ruteplanen.

I tillegg til total tid ved kai (kolonne 4), kan brukeren definere en stopptid, som kommer i tillegg til total tid ved kai. Stopptid brukes for lengre stopp uten passasjerer ombord (e.g. pauser i ruteplan om dagen eller stopp om natten). Program vil da bruke et lavere hjelpesystem og hotell forbruk i beregning under stoppene.

Avgangs- og ankomsttider settes in manuelt slik at brukeren må alltid passe på at de stemmer med de valgte tid ved kai og stopptid.

Departures	Arrivals	Unloading/Loading time	Extra time @ quay	Total time @ quay	Stops
06:00:00	06:25:00	00:05:15	00:00:15	00:05:30	00:00:00
07:00:00	07:25:00	00:05:15	00:00:15	00:05:30	00:00:00
08:00:00	08:25:00	00:05:15	00:00:15	00:05:30	00:30:00

Stopptid kan ikke settes inn på en linje uten avgang:

19:30:00	19:55:00	00:05:15	00:00:15	00:05:30	00:00:00
20:30:00	20:55:00	00:05:15	00:00:15	00:05:30	00:00:00
21:30:00	21:55:00	00:05:15	00:00:15	00:05:30	00:00:00
00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00
00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00

Siste del er å definere dekkslast for å ta hensyn til trafikkdata. 100% betyr at ferge er full med biler. Dødvect vil beregnes automatisk og påvirke skrogrmotstand/effekt ved propulsjon.

Deck loading
100%
100%
100%
100%
100%

Antall transporterte biler, overfart, fart («*Initial speed*» er fart som ikke tar hensyn til manøvrering, akselerasjon, etc. Reell konstant transitt fart vil beregnes etterhvert og blir lavere en *Initial speed*).

7	8	9
Cars transported	Crossing time	Initial speed (kts)
70	00:25:00	8,94
70	00:25:00	8,94
70	00:25:00	8,94
70	00:25:00	8,94
70	00:25:00	8,94
70	00:25:00	8,94

Følgende kollonner er ikke relevant for brukerne.

Alle verdier definert av brukeren kan også slettes automatisk med knapper:

Clear schedule

Clear extra time

Fill extra time

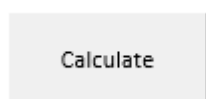
Total time @ quay :
00:05:30

Clear Stops

Clear deck loading

7.4 KJØRING AV PROGRAM, RESULTATER & EKSPORT

Program kjøres i «*Summary*» arket når all input i «*Ferry1*» til «*Ferry5*» og i «*Advanced Inputs*» arkene er definert. Programmet bruker rundt 4 sekunder til å fullføre beregninger.



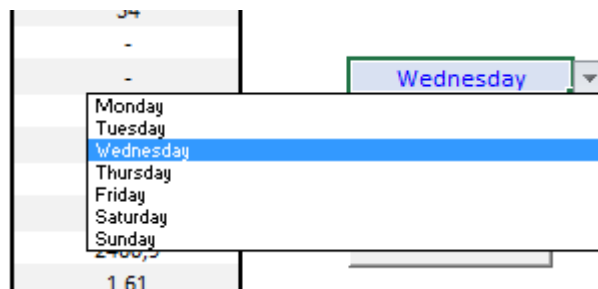
Click on calculate button above to run calculations

I «*Summary*» arket er det også mulig å utelukke en eller flere ferger fra beregninger selv om de er definert i «*Ferry1*» til «*Ferry5*» arkene.

Included in calculations?	yes	no
Name	Ferry1	Ferry2
Concept	70 Mono Steel Diesel Mech	70 Mono Steel Diesel Mech
Fuel consumption (m3)	2.15	2.15
Fuel energy consumption (MWh)	22.48	22.48
Fuel cost (NOK)	11,370	11,370
Shore power used in operation (kW)	0	0
Electricity consumption in operation (MWh)	0.000	0.000
Electricity consumption at stops and in operation (MWh)	0.311	0.311
Electricity cost (NOK)	311	311
Energy consumption from elec. and fuel (MWh)	22.8	22.8
Energy cost from elec. and fuel (NOK)	11,681	11,681
Energy production (MWh)	7.9	7.9
Battery capacity (kWh)	0	0
Battery range used in operation (%)	0	0
Emissions of CO2-eq (t)	6.1	6.1
Emissions of NOx (t)	0.12	0.12
Energy efficiency (MJ/Cars)	36.6	36.6
Emission levels CO2-eq (g/kWh)	774.8	774.8
Emission levels CO2-eq (g/Cars)	2723	2723
Emission levels NOx (g/kWh)	15.22	15.22
Emission levels NOx (g/Cars)	53.48	53.48
Cars transported	2,240	2,240

Alle resultatene vises i tabell og graf formater. Resultatene vises for hver separat ferge og for alle fergene kombinert (samband).

Til slutt kan resultatene eksporteres til «Export» arket:



I «Export» arket kan resultatene fra en eller flere dager også kombineres til et totalt kombinert resultat.

APPENDIX A : HYDROGEN & BRENSELCELLER PÅ FERGER (CMR PROTOTECH)

A.1 HYDROGEN OG BRENSELCELLER

Brenselceller, som batterier, fungerer ved at de konverterer lagret kjemisk energi til elektrisk energi som eksempelvis kan brukes til kraftforsyning for elektromotorer og hotellkraft om bord i en ferje. Ettersom konverteringen foregår elektrokjemisk uten bruk av forbrenning, opererer brenselceller generelt ved høyere virkningsgrad enn forbrenningsmotorer gjør, typisk 50 - 70% (LHV) avhengig av brenselcelleteknologi, som fører til tilsvarende redusert energiforbruk. En annen vesentlig fordel med brenselceller og batterier sammenlignet med forbrenningsmotorer er betydelig redusert støy.

De fleste brenselcelleteknologier benytter hydrogen som drivstoff. Elektrisk kraft produseres ved at hydrogen og oksygen fra luft kombineres til vann og energi ($H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O + el + \text{varme}$). Hydrogendrevne brenselceller representerer dermed en framdriftsteknologi uten direkte utslipp av klimagasser eller partikler (eneste utslipp er rent vann). Dersom hydrogenet er produsert ved elektrolyse (splitte vann i hydrogen og oksygen) og ved å bruke elektrisitet fra fornybare kraftkilder, vil hydrogendrevne brenselceller representere en (tilnærmet) nullutslippsløsning for fremdrift av ferjer.

Hovedforskjellen mellom brenselceller og batterier er at den kjemiske energien lagres eksternt i lagringstanker framfor internt i batteriets elektrodematerialer. En kan dermed fylle på mer energi på tankene på kort tid i stedet for å måtte lade systemet. Dette fører også til at en kan få mer energi lagret om bord ved å øke størrelsen på lagertankene uten å måtte øke mengden brenselceller. Ved større energibehov, eksempelvis for lengre ferjestrekninger eller høyere overfartshastighet, vil derfor brenselcellesystemer gi vektbesparelser i forhold til ren batteridrift. Hydrogendrevne brenselceller gir dermed en mulig nullutslippsløsning for ferjestrekninger hvor ren batteridrift ikke er hensiktsmessig (grunnet vekt eller ladeinfrastruktur).

I tillegg til å lagre og tilføre hydrogen direkte til brenselcellene, kan også andre typer brensel som inneholder hydrogen, for eksempel naturgass (CH_4), metanol (CH_3OH) og etanol (C_2H_5OH), benyttes. For brenselceller som opererer ved moderate temperaturer må drivstoffet da først reformeres i en reformer for å skille ut hydrogenet til bruk i brenselcellene. For noen typer brenselceller som opererer på høy temperatur (600 - 1000°C) kan denne reformeringen ta sted direkte i cellene, slik at f.eks. LNG, biometanol etc. kan benyttes direkte. Ved bruk av hydrokarboner/alkoholer som bærer for hydrogen, vil en få lokale utslipp av CO_2 , men i mindre grad enn ved bruk av forbrenningsmotorer grunnet økt virkningsgrad. Dersom biodrivstoff benyttes, vil den totale klimabelastningen også i dette tilfellet være tilnærmet null.

A.1.1 ULIKE BRENSELCELLETEKNOLOGIER

Det finnes en rekke ulike brenselcelleteknologier, som hver har ulike fordeler og ulemper. Tabell A-1⁴² gir en oversikt over ulike teknologier med vurdering av anvendbarhet i ferjer. Lavtemperatur PEM (Proton Exchange Membrane) brenselceller er mest brukt i hydrogenbiler og -busser og ansees som den mest modne teknologien for transportformål. Det er også den teknologien som antas å ville utvikles mest (i forhold til pris) i de nært forestående årene, i sammenheng med økt masseproduksjon av brenselcellemoduler først og fremst til biler. På noe lengre sikt vil det

⁴² Comparisons of Fuel Cell Technologies, <http://energy.gov/eere/fuelcells/comparison-fuel-cell-technologies>, 2014

derimot bli mer og mer aktuelt å ta i bruk høytemperatur (HT) PEM (opererer på om lag 150°C) samt SOFC (Solid Oxide Fuel Cell)-teknologi (opererer på om lag 600 - 1000°C), som vil gi økt virkningsgrad og som lettere kan ta i bruk andre drivstoff enn ren hydrogen. Et SOFC system vil kunne operere ved en virkningsgrad på om lag 70% (LHV) innen 5 - 10 år, og til konkurransedyktige priser. I tillegg gir den høye temperaturen mulighet til effektiv utnyttelse av restvarme, og dermed videre øke systemets totale virkningsgrad.

I avsnitt A.1.4 er energiforbruk, vekt, volum og kostnad for tre ulike løsninger for brenselcelledrift beregnet;

- Lavtemperatur PEM med hydrogen lagret som komprimert gass om bord
- Høytemperatur PEM med (bio)metanol som brensel
- SOFC med (bio)LNG som drivstoff

Lavtemperatur PEM ansees som den mest aktuelle/modne teknologien på kort sikt, mens SOFC (drevet av hydrogen eller LNG/biogass/bio(m)etanol) vurderes som optimal løsning om 5 - 10 år.

FC teknologi	PEM	Alkalisk	HTPEM	PAFC	MCFC	SOFC
Typiske anvendelser	- Transport - Reservekraft - Desentralisert kraft	- Militær - Romfart - Reservekraft - Transport	- Reservekraft - Desentralisert kraft - Maritim (APU) ⁴³ - Romfart	- Desentralisert kraft	- Desentralisert kraft - Storskala kraftproduksjon - Maritim (APU) ⁴⁴	- Desentralisert kraft - Storskala kraftproduksjon
Temperatur	< 120°C	< 100°C	100-230°C	150-200°C	600-700°C	500-1000°C
Drivstoff	Hydrogen	Hydrogen	Hydrogen	Hydrogen	Hydrogen, Metan/LNG, CO	Hydrogen, Metan/LNG, CO
Elektrisk Virkningsgrad (LHV)	50-60 %	50-60 %	50-60 %	40 %	50 %	60 %
Elektrisk Virkningsgrad (LHV) 2025	60-65 %	60 %	70 %	40-50%	55 %	70 %
Pris per kW	1 800 \$	3 000 €	10 000 €	4 300 \$	4 000 \$	10 000 €
Estimert pris per kW 2020^{45,46}	800 \$	2 000 €	2 500 €	4 000 \$	4 000 \$	3 000 €
Estimert pris per kW 2025^{2,3}	400 \$	1 500 €	1 000 €	2 000 \$	2 000 \$	1 500 €
Fordeler	- Moden teknologi - Rask oppstart - Lav temperatur	- Moden teknologi - Rask oppstart - Lav temperatur	- Høyere temperatur gir økt virkningsgrad - Forenklet fuktkontroll - Mulig utnyttelse av restvarme - Økt tolerant til urenheter i drivstoff	- Mulig utnyttelse av restvarme - Økt toleranse for urenheter i drivstoff - Stabil/lang levetid	- Moden teknologi - Mulig utnyttelse av høyverdi restvarme	- Høy virkningsgrad - Mulig utnyttelse av høyverdi restvarme (kombinert virkningsgrad på 85 % i kombinerte systemer) - Fleksibel på drivstoff
Ulemper	- Sensitiv til urenheter i drivstoff - Dyrt katalytisk materiale	- Håndtering av elektrolytt - Sensitiv til CO2 - Høy vekt	- Umoden/lite utprøvd i stor skala - Oppstartstid	- Lang oppstartstid - Høy pris - Lav virkningsgrad	- Lav energitetthet (per vekt og volum) - Lang oppstartstid	- Krever teknologiutvikling (prisreduksjon) - Høy temperatur krever varmehåndtering - Lang oppstartstid
Vurdering bruk i ferjer	- Godt egnet	- Middels godt egnet	- Mindre godt egnet (på kort sikt). Godt egnet på lengre sikt	- Lite egnet	- Lite egnet	- Godt egnet på lengre sikt, særlig som del av hybridløsning med PEM FC/batterier

Tabell A-1: Sammenligning av brenselcelleteknologier og vurdering av egnethet for bruk i ferjer

A.1.2 HYDROGEN SOM ENERGIBÆRER

Hydrogen er ikke en energikilde i seg selv, men en energibærer. Det vil si at hydrogen må produseres fra/ved bruk av andre energikilder. I dag er nesten all hydrogen produsert fra fossilt brensel (hovedsakelig naturgass) ved hjelp av dampreforming eller partiell oksidasjon, og brukt til raffinering av olje og ammoniakkproduksjon. Hydrogenproduksjon ved elektrolyse, dvs. splitting vann i hydrogen og oksygen ved hjelp av elektrisitet, utgjør i dag om lag 5% av global hydrogenproduksjon. I Norge har hydrogenproduksjon ved elektrolyse lang historie (siden 1927) gjennom Norsk Hydro. Norge er og har vært egnet for elektrolyse grunnet god tilgang på

⁴³ Fellowship - Viking Lady, <http://vikinglady.no/>

⁴⁴ e4ships – fuel cells in marine applications, <http://www.e4ships.de/e4ships-home.html>

⁴⁵ Manufacturing Cost Analysis of Stationary Fuel Cell Systems, B. D. James et. al., 2012

⁴⁶ Molten Carbonate and Phosphoric Acid Stationary Fuel Cells: Overview and Gap Analysis, R. Remic, D. Wheeler, 2010

vannkraft, noe som har ført til at Norsk Hydro, nå videreført i NEL Hydrogen, er verdensledende på (alkalisk) elektrolysereteknologi. Økt bruk av hydrogen som drivstoff vil derfor gi økt marked for hydrogenproduksjon og således bidra til norsk næringsutvikling. Lave kraftpriser og økt fokus på «ren» produksjon av hydrogen basert på fornybar kraft, blant annet til transportformål, vil bidra til denne utviklingen.

Hydrogen kjennetegnes ved høy spesifikk energi (energi per vektenhet), men med lavere energitetthet (energi per volumenhet) sammenlignet med konvensjonelle drivstofftyper. Hydrogen kan (hovedsakelig) oppbevares på tre ulike måter; enten som gass, som flytende hydrogen (nedkjølt til -253°C) eller som metallhydrid, dvs. kjemisk bundet til metaller. Trykksatt gass er per i dag mest brukt til transportformål grunnet dets enkelhet, mens flytende hydrogen ofte er i bruk ved behov for lagring av store mengder hydrogen. Ved lagring av hydrogen i metallhydrid brukes varme for å hente ut hydrogenet. Ved å bruke varme fra brenselceller (fortrinnsvis høytemperatur brenselceller) kan effektive systemer med lav vekt og relativt høy energitetthet designes. På kort sikt er likevel trykksatt hydrogen ansett å være det mest aktuelle lagringsalternativet for hydrogen til bruk i ferger.

Hydrogen kan også, som beskrevet innledningsvis, lagres kjemisk i andre stoffer som naturgass/andre hydrokarboner eller metanol/etanol. Hydrogen må da hentes ut gjennom en reformeringsprosess, og en vil også ha lokale karbonutslipp. Fordelen med å benytte andre drivstoff er forenklet lagring om bord (lavere trykk og opptar mindre volum), og at en kan benytte eksisterende infrastruktur for tanking.

Som for alt annet drivstoff og alle former for lagring av energi vil det være en risiko knyttet til lagring og bruk av hydrogen, som må håndteres. En rekke internasjonale maritime prosjekter, samt bruk av hydrogen i biler og busser, har vist at det er fullt mulig å designe systemer som ivaretar sikkerhet på lik linje med eksisterende teknologi. Det eksisterer per i dag ikke regelverk som dekker bruk av hydrogen og brenselceller i fartøy. Dette medfører at det kreves mye dokumentasjon i form av risikoanalyser osv. for å ta i bruk slik teknologi. Ved å gjennomføre et fullskala demoprojekt, og videre ta i bruk ferje i konvensjonell drift, vil en parallelt kunne utvikle nødvendig regelverk og klassekrav som senere kan forenkle prosessen med godkjenning av nye fartøy.

A.1.3 HYDROGENPRODUKSJON VED VANNELEKTROLYSE BASERT PÅ FORNYBAR KRAFT

Hydrogen produsert ved elektrolyse med bruk av fornybar kraft representerer et mulig nullutslippsdrivstoff til ferjer, og er derfor en foretrukken løsning sett i lys av mål om reduserte klimagassutslipp og utvikling av bærekraftige løsninger for transport. Tabell A-2 viser sammenligning av egenskaper for ulike teknologier for elektrolyse⁴⁷, samt beregnet produksjons- og distribusjonskostnad per kg hydrogen. Alkalisk og PEM er de mest modne og kommersielt tilgjengelige teknologiene, mens SOEC (solid oxide electrolyser cell) har stort potensial (noe som fører til stor R&D aktivitet rettet mot utvikling av SOEC-teknologi).

⁴⁷ Development of Water Electrolysis in the European Union, L Bertuccioli et. al., 2014

Teknologi	Alkalisk	PEM	SOEC
<i>Modenhet</i>	Moden, lang erfaring	Moden	Ikke kommersielt tilgjengelig
<i>Virkningsgrad (HHV)</i>	70-75 %	65-70 %	75 %
<i>Virkningsgrad 5-10 år</i>	75-80 %	80-85 %	80-90 % ⁴⁸
<i>Elektrolysepris per kW</i>	1000 - 1200 €	1900 - 2100 €	N/A
<i>Elektrolysepris per kW 5-10 år</i>	600 €	760 €	1500 €
<i>Estimert kostnad per kg hydrogen inkl. kompresjon og fylling</i>	50 NOK/kg	60 NOK/kg	N/A
<i>Estimert kostnad per kg hydrogen 5-10 år inkl. kompresjon og fylling</i>	30 NOK/kg	30 NOK/kg	30 NOK/kg

Tabell A-2: Sammenligning av teknologi for hydrogenproduksjon ved elektrolyse

Et hydrogenproduksjonsanlegg basert på elektrolyse vil bestå av kraft fra ekstern energikilde (fortrinnsvis vannkraft, vindkraft, solenergi, eller andre fornybare kilder), elektrolyse, kompressor og et mellomtrykklager. Videre vil en fyllestasjon ta hydrogen fra et mellomtrykklager og komprimere (og kjøle ned) til trykknivå i ferjen før det fylles over til lagertanker om bord. Tabell A-2 viser at alkalisk elektrolyse er mest moden og gir lavest hydrogenpris på kort sikt (om lag 50 NOK/kg). På noe lengre sikt er pris per kg hydrogen (inkludert kompresjon og fylling) forventet å nå 30 NOK/kg. Det er verd å merke seg at innkjøp av kraft utgjør størstedelen av kostnadene for et hydrogenproduksjonsanlegg, som fører til at pris på hydrogen derfor er svært sensitiv til tilgjengelig kraftpris.

A.1.4 TEKNISK LØSNING OG BEREGET KRAFT- OG ENERGIFORBRUK FOR 50 PBE FERGE

Som grunnlag for utarbeidelse av teknisk løsning og beregninger for brenselcelledrevet ferge er tekniske spesifikasjoner for 50 PBE ferge gitt. Videre er følgende kraftbehov og driftsprofil for 1 overfart lagt til grunn:

Operasjon	Fremdriftslast [kW]	Hotellast [kW]	Tid (kort overfart) [min]	Tid (lang overfart) [min]
<i>Manøvrering</i>	180	100	1,5	1,5
<i>Akselerasjon</i>	420	100	2	2
<i>Overfart jevn last</i>	350	100	10	35
<i>Retardasjon</i>	90	100	2	2
<i>Ved kai, lasting/lossing</i>	35	100	5	5
<i>Ved kai, natt/lengre opphold</i>	0	20	6 timer	6 timer

I tillegg vil fergen designes med tilstrekkelig motorkraft til å kunne holde en maksfart på 30% høyere hastighet enn ved jevn service speed. Da sjømotstand øker med hastighet i tredje potens, vil ferjens maksimale kraftbehov være om lag 950 kW.

Fremdriftssystemet for en brenselcelledrevet ferge vil bestå av hydrogentanker, brenselcellemoduler med kjølesystem/lufttilførsel, batteripakker, DCDC omformere, DC bus, DCAC omformere, elektromotorer og thrustere/propeller. Lavtemperatur PEM brenselceller er fleksible i forhold til oppstart og lastvariasjoner og er dermed i stand til å dekke omtrent hele ferjens lastprofil, med en liten batteripakke får å ta raske variasjoner i kraftforbruk. Samtidig kan det være fordelaktig med en større batteripakke for å sørge for en jevnere last på brenselcellene, noe som gir noe økt virkningsgrad og kan forlenge levetiden. Tilgjengelig kraft fra landstrøm til lading av batterier vil også gjøre det fordelaktig med større batteripakker om bord. Høytemperatur brenselceller bør opereres på mest mulig jevn last, og vil måtte kombineres med batteripakker (eventuelt PEM brenselceller) for å dekke variasjoner i kraftbehov.

⁴⁸ Virkningsgrad kan økes ytterligere ved å tilføre varme

Tabell A-3 viser vekt og volum for hovedkomponenter (hydrogentanker, brenselceller, batterier, DCDC omformere), og kostnader for installasjon, vedlikehold og drivstoff i et 10 års perspektiv.

	Kort overfart	Lang overfart
<i>Tid mellom hver avgang</i>	20 min	45 min
<i>Tid ved kai</i>	5 min	5 min
<i>Nominelt kraftbehov brenselceller</i>	359 kW	423 kW
<i>Energiforbruk brenselceller per tur</i>	122 kWh	324 kWh
<i>Kapasitet batterier</i>	81 kWh	113 kWh
<i>Hydrogenforbruk per tur</i>	5,8 kg	15,7 kg
<i>Hydrogenforbruk per dag</i>	310 kg	378 kg
<i>Vekt energisystem</i>	9,2 tonn	10,7 tonn
<i>Volum energisystem</i>	27 m ³	31,2 m ³
<i>Investeringskostnader</i>	18,3 MNOK	18,9 MNOK
<i>Årlige drivstoffkostnader</i>	5,7 MNOK	6,9 MNOK
<i>Sum årlige kostnader for investering, vedlikehold og drift (10 års drift)</i>	9,5 MNOK	10,8 MNOK

Tabell A-3: 50 pbe ferge med fremdriftssystem basert på hydrogen og PEM brenselceller. Kraft- og energiforbruk, hydrogenforbruk, systemmasse, -volum og kostnad (hydrogentanker, brenselceller, batterier og DCDC omformere) for kort og lang overfart er sammenlignet.

Beregninger er basert på tilgjengelige teknologi til dagens (2015) priser. Til sammenligning vil et dieselbasert system for «lang» ferjestrekning (med 40% virkningsgrad på dieselmotor) ha om lag 3,6 MNOK i årlige utgifter til drivstoff (med dagens lave dieselpriis på 5 NOK/liter). Det er videre antatt 1 fylling per dag (antall fyllinger har stor innvirkning på vekt og volum), og ingen tilgjengelig landstrøm (tilgjengelig landstrøm vil kunne redusere hydrogenforbruket, og dermed redusere systemets/lagringstankers vekt og volum). Beregningene viser at systemvekt, -volum og kostnader endrer seg relativt lite med endret overfartslengde, noe som underbygger at hydrogen og brenselcelledrift er særlig attraktivt for lengre ferjestrekninger hvor lav-/nullutslippsteknologi er ønskelig å ta i bruk.

I dag er hoveddelen av installasjonskostnadene for et brenselcelledrevet fremdriftssystem relatert til kostnader for brenselcellemoduler. Potensialet for prisreduksjon er stort. Eksempelvis vil den nylig lanserte Toyota Mirai (hydrogendrevet brenselcellebil) selges for om lag 40% av prisen for en kommersielt tilgjengelig brenselcellemodul med samme effekt. Pris på brenselceller er derfor forventet å synke betydelig med økende salgsvolum. Samtidig er virkningsgrad og levetid forventet å øke. I tabell A-4, tabell A-5 og tabell A-6 er systemvekt, -volum og kostnader for hydrogendrevet PEM, metanoldrevet HTPEM og naturgassdrevet SOFC sammenlignet, for hhv dagens teknologistandard, teknologiutvikling i 3 - 4-års perspektiv, og for teknologiutvikling i 10-års perspektiv. Beregningene er basert på 50 PBE ferge med «lang» overfart (45 min mellom hver avgang, 5 min ved kai).

	Hydrogen PEM	Metanol HTPEM	LNG SOFC
<i>Vekt energisystem</i>	9,2 tonn	5,6 tonn	8,5 tonn
<i>Volum energisystem</i>	27 m ³	9 m ³	8 m ³
<i>Investeringskostnader</i>	18,9 MNOK	75,9 MNOK	78,2 MNOK
<i>Drivstoffkostnader per år</i>	6,9 MNOK	3,5 MNOK	2,2 MNOK
<i>Sum årlige kostnader for investering, vedlikehold og drift (10 års drift)</i>	10,8 MNOK	19,2 MNOK	15,6 MNOK

Tabell A-4: Systemvekt, -volum og kostnader for hydrogendrevet PEM, metanoldrevet HTPEM, og naturgass (LNG)-drevet SOFC. Dagens teknologi og priser

	Hydrogen PEM	Metanol HTPEM	LNG SOFC
<i>Vekt energisystem</i>	7,4 tonn	5,6 tonn	8,5 tonn
<i>Volum energisystem</i>	19 m ³	9 m ³	8 m ³
<i>Investeringskostnader</i>	10,4 MNOK	19,8 MNOK	25,8 MNOK
<i>Drivstoff per år</i>	5,5 MNOK	3,2 MNOK	1,7 MNOK
<i>Sum årlige kostnader for investering, vedlikehold og drift (10 års drift)</i>	7,9 MNOK	7,3 MNOK	7,1 MNOK

Tabell A-5: Systemvekt, -volum og kostnader for hydrogendrevet PEM, metanoldrevet HTPEM, og naturgass (LNG)-drevet SOFC. Teknologiutvikling 3 - 4-års perspektiv.

	Hydrogen PEM	Metanol HTPEM	LNG SOFC
<i>Vekt energisystem</i>	7,4 tonn	5,6 tonn	8,3 tonn
<i>Volum energisystem</i>	19 m ³	8 m ³	8 m ³
<i>Investeringskostnader</i>	6,2 MNOK	8,6 MNOK	14,6 MNOK
<i>Drivstoff per år</i>	4,1 MNOK	2,6 MNOK	1,4 MNOK
<i>Sum årlige kostnader for investering, vedlikehold og drift (10 års drift)</i>	5,6 MNOK	4,8 MNOK	4,5 MNOK

Tabell A-6: Systemvekt, -volum og kostnader for hydrogendrevet PEM, metanoldrevet HTPEM, og naturgass (LNG)-drevet SOFC. Teknologiutvikling 10-års perspektiv.

Tabell A-4, tabell A-5 og tabell A-6 viser tydelig viktigheten av å drive frem teknologiutvikling i årene som kommer. Gitt forventet teknologiutvikling vil hydrogendrevne brenselceller kunne være fullt ut konkurransedyktig innen få år. Høytemperatur brenselceller på LNG vil videre, i tillegg til betydelig redusert drivstoff- og energiforbruk (70% virkningsgrad mot ca. 30%), være kostnadsbesparende sammenlignet med konvensjonelle fremdriftssystemer for ferjer. Et optimalt hydrogen-brenselcellesystem er innen 10 år forventet å bestå av SOFC brenselceller (70% LHV virkningsgrad) for snittlast, metallhydrid eller trykksatt hydrogen for hydrogenlagring, samt batterier eller PEM brenselceller for lastvariasjoner. Kombinert med høytemperatur SOEC elektrolyse vil en oppnå et energieffektivt (total virkningsgrad fra kraftnett til elektromotor på om lag 50%) nullutslippsalternativ for fremdrift av ferger.

A.1.5 OPPSUMMERING, VURDERING AV IMPLEMENTERBARHET OG VIDERE ANBEFALINGER

Det finnes en rekke prosjekter hvor hydrogen og brenselceller er tatt i bruk i maritim virksomhet. Et kjent eksempel er det norske forskningssupply-skipet Viking Lady har installert og demonstrert 330 kW brenselceller (MCFC) som APU (Auxiliary Power Unit) om bord. Tidligere har CMR Prototech installert hydrogendrevet brenselcelle/batterihybridssystem på passasjerbåten MF Vaagen i Bergen. Internasjonalt har også flere prosjekter blitt gjennomført de siste årene. Prosjektene «Zemships» i Hamburg – etablering og drift et hydrogen og PEM brenselcelledrevet passasjerskip for 100 personer (godkjent iht. klasseregler fra GL), og «Nemo H2» – et passasjerskip for 88 personer i Amsterdam, viser at det er fullt mulig å installere hydrogen- og brenselcellesystemer i fartøy. I Tyskland pågår nå flere aktiviteter relatert til brenselceller for maritim bruk (hovedsakelig som APU for større skip), under prosjektet e4ships.

Fergers egenskaper og operasjonsprofil tilsier at de er godt egnet for bruk av brenselceller. Relativt god lagringsplass i skrog, relativt høy vekt, høyt energibehov relativt til maks kraftbehov, gjør at hydrogen kan brukes som mulig nullutslippsdrivstoff. Videre vil brenselcellers økte virkningsgrad i forhold til forbrenningsmotorer føre til betydelig redusert energiforbruk sammenlignet med konvensjonell teknologi. Beregninger i dette prosjektet viser at:

- Hydrogen og brenselceller kan fungere som et fullverdig energieffektivt alternativ for nullutslipp fremdrift av ferger
- Brenselceller er særlig fornuftig for lengre strekninger (hvor ren batteridrift ikke er mulig av hensyn til vekt og ladekapasitet)
- Drivstoff (elektrisk kraft til hydrogenproduksjon) representerer hovedkostnad – nødvendig med god infrastruktur

Videre vil bortfall av CO₂- og NO_x-avgift, samt støtte til økte investeringer fra NO_x-fond/Enova/andre støtteordninger, begrense kostnadsdifferansen for et hydrogenrevet brenselcellesystem sammenlignet med konvensjonelt system. Hydrogendrift av ferger bør derfor kunne være attraktivt allerede med dagens teknologi.

CMR Prototech gjennomførte i 2014 et forprosjekt støttet av Transnova med tittel «Hydrogen som drivstoff for skip – Fra fornybar energi til utslippsfri fremdrift» i samarbeid med ulike aktører bl.a. fra klyngen NCE Maritime Clean Tech (IFE, Wave Propulsion, Rødne og sønner, SKL, Wärtsilä, Eidesvik Offshore, Westcon, HMMS, Brødrene Aa). Hovedformålet med forprosjektet har vært å samle ulike initiativ for å se på muligheter for å bruke hydrogen som drivstoff i ulike maritime fartøy, som grunnlag for etablering av ett eller flere demonstrasjonsprosjekt(er). Både hydrogenproduksjon fra fornybar kraft, fylleanlegg på land, og hydrogensystem om bord ble evaluert. Videre ble det spesifikt sett på hurtiggående passasjerbåt på strekningen mellom Bergen og Rosendal (operert av Rødne) basert på dagens tilgjengelige teknologi, samt for offshore supply-skip og anlegg for produksjon av flytende hydrogen i et noe lengre perspektiv. I tillegg til teknisk-økonomiske vurderinger er det også gjort et omfattende arbeid relatert til regelverk og klassekrav.

Hovedkonklusjonen fra forprosjektet er at det ikke er identifisert noen tekniske eller økonomiske «show stoppere» fra å etablere fullskala fartøy drevet av hydrogen og brenselceller. Videre vil det være behov for å utvikle regelverk og klassekrav for å omfatte bruk av hydrogen og brenselceller til passasjerdrift, noe som vil kunne bli gjort parallelt med demonstrasjon av teknologi i et demoprojekt.

For å bringe hydrogenteknologi til et kommersielt nivå, og dermed utvikle et fullverdig nullutslippsalternativ til dagens fossilbaserte energisystemer i fartøy, vurderes det som avgjørende å etablere et fullskala demoprojekt. Viktige momenter er:

- Politisk forankring - vise at dette er mulig.
- Testing av teknologi og systemer i maritimt miljø, opparbeidelse av erfaring.
- DSB/SD trenger å se at teknologien fungerer for å kunne tilpasse regelverk.
- Bidra til å utvikle regelverk som forenkler godkjenningsprosess i fremtidige prosjekter.

APPENDIX B : KLIMA- OG MILJØVURDERING AV MARINE DRIVSTOFF (NORSK ENERGI)

Klima- og miljøvurderinger av de marine drivstoffene marin gassolje (MGO), flytende naturgass (LNG) og elektrisitet er omfattet. Utslipp av klimagasser (CO₂-ekv), NO_x, SO₂ og partikler (PM₁₀) anses som de mest sentrale utslippene fra ferger, og er derfor de utslippene som har blitt vurdert i dette prosjektet.

B.1 METODIKK: LIVSLØPSANALYSE

Klima- og miljøvurderingene knyttet til de analyserte drivstoffene er basert på metodikken for livsløpsanalyser (LCA). LCA omfatter all ressurs- og energibruk i løpet av et produkts levetid, og ansees som en helhetlig analyse av miljøpåvirkning fra et produkt. Livsløpsanalyser hindrer at problemer i verdikjeden forskyves mellom livsløpsfaser, da alle livsløpsfasene til et produkt inngår i analysen. Erfaring og litteratur tilsier likevel at bruksfasen er den livsløpsfasen som forbindes med mest negativ påvirkning på miljø. I vurderingene utført i dette prosjektet er livsløpsfasene som inkluderes produksjon (inkludert transport, distribusjon og lagring) av drivstoffet og bruk (forbrenning) av drivstoffet. Systemgrensen er altså satt slik at produksjon og forbrenning inngår, mens produksjon av kapitalgoder ikke er inkludert. Kapitalgoder er i denne sammenheng produksjon av ferger, motorer og annen infrastruktur. Erfaring tilsier at driftsfasen er fasen med høyest miljøpåvirkning, og det ble derfor vurdert som mest hensiktsmessig å inkludere produksjon og forbrenning av drivstoff, men å utelate kapitalgoder.

B.2 DATA

Klima- og miljøvurderingene er basert på datainnhenting fra databaser for livsløpsdata og litteratur. Datakilder og forutsetninger for de vurderte drivstoffene følger.

MGO

Dataene omfatter utvinning, prosessering, transport og produksjon av MGO, samt utslipp fra bunkring og forbrenning.

Data for utslipp fra produksjon av MGO ble hentet fra databasen ELCD (European reference Life-Cycle Database). Datasettet for Light Fuel Oil er antatt å være representativt for MGO med svovelinnhold på 0,1 %. Datasettet inneholder data for utvinning, prosessering, transporter og produksjon av MGO.

Data for bunkring er hentet fra Bengtsson et. al (2011). *Life cycle assessment of marine fuels. A comparative study of four fossil fuels for marine propulsion*. Chalmers University of Technology.

Data for forbrenning er hentet fra Bengtsson et. al (2011). *Life cycle assessment of marine fuels. A comparative study of four fossil fuels for marine propulsion*. Chalmers University of Technology, som har hentet data fra NTM 2008. Environmental data for international cargo and passenger sea transport. Version 2008-10-18 ed.: Nätverket för transporter och miljö.

MGO med selektiv katalytisk reduksjon (SCR)

Dataene omfatter utvinning, prosessering, transport og produksjon av MGO, samt utslipp fra bunkring og forbrenning. Ureaproduksjon er ikke tatt med i datasettet.

Data for utslipp fra produksjon av MGO ble hentet fra databasen ELCD (European reference Life-Cycle Database). Datasettet for light fuel oil er antatt å være representativt for MGO med svovelinnhold på 0,1 %. Datasettet inneholder data for utvinning, prosessering, transporter og produksjon av MGO.

Data for bunkring er hentet fra Bengtsson et. al (2011). *Life cycle assessment of marine fuels. A comparative study of four fossil fuels for marine propulsion*. Chalmers University of Technology.

Data for forbrenning er hentet fra Bengtsson et. al (2011). *Life cycle assessment of marine fuels. A comparative study of four fossil fuels for marine propulsion*. Chalmers University of Technology, som har hentet data fra NTM 2008. Environmental data for international cargo and passenger sea transport. Version 2008-10-18 ed.: Nätverket för transporter och miljön.

Data for SCR er hentet fra Bengtsson et. al (2012). *Environmental assessment of two pathways towards the use of biofuels in shipping*. Energy Policy 44 (2012) 451-463.

LNG

Dataene omfatter utvinning, kondensering, distribusjon og lagring av LNG, samt utslipp fra forbrenning.

Alle data ble hentet fra Brynolf et. al (2014). *Environmental assessment of marine fuels: Liquefied natural gas, liquefied biogas, methanol and bio-methanol*. Journal of Cleaner Production 74 (2014) 86-95.

Elektrisitet

Data for utslipp fra produksjon av norsk elektrisitet hentet fra databasen Ecolnvent v3, og fra bakgrunnsrapporten for klimakalkulatoren, Norges offisielle klimagasskalkulator.

Som oppsummert i

Resultatene for «Elektrisitet, Norsk Ecolnvent v.3» i tabell 2 er basert på Ecolnvent sin prosess «Electricity, low voltage, NO, market for» og er data som er ekstrapolert fra data for norsk elektrisitetsbruk i 2008, hentet fra det internasjonale energibyrået (IEA).

Resultatene for norsk, nordisk og europeisk elektrisitet er hentet fra bakgrunnsrapporten for klimakalkulatoren:

http://www.klimakalkulatoren.no/media/2382/klimakalkulatoren_bakgrunnstall_dokumentasjon_030413.pdf Her gis resultatene kun i CO₂-ekvivalenter, og dette er grunnen til at resultatene for norsk, nordisk og europeisk elektrisitet har resultater i kategoriene NO_x, SO₂ og partikler (PM₁₀). Ved norsk og nordisk elektrisitet antas det at resultatene for nor «Elektrisitet, Norsk Ecolnvent v.3» er gyldige.

For mer omfattende detaljer vedrørende forutsetninger ved dataene som er brukt vises det til oppgitte litteraturkilder.

B.3 RESULTATER FOR DE VURDERTE DRIVSTOFFENE

Tabell 1: Klima- og miljøpåvirkning fra produksjon og bruk av marine drivstoff

	Enhet	Produksjon	Forbrenning	Total
MGO	CO ₂ (g/kg)	301,63	3 177,34	3 478,97
	CO ₂ -ekvivalenter (g/kg)	397,22	3 218,36	3 615,58
	NO _x (g/kg)	0,88	65,02	65,91
	SO ₂ (g/kg)	1,75	2,00	3,75
	PM ₁₀ (g/kg)	0,13	1,48	1,61
MGO med SCR	CO ₂ (g/kg)	301,63	3 177,34	3 478,97
	CO ₂ -ekvivalenter (g/kg)	397,22	3 218,36	3 615,58
	NO _x (g/kg)	0,88	7,26	8,14
	SO ₂ (g/kg)	1,75	2,00	3,75
	PM ₁₀ (g/kg)	0,13	0,47	0,60
LNG	CO ₂ (g/kg)	365,20	2 376,00	2 741,20
	CO ₂ -ekvivalenter (g/kg)	407,84	3 250,72	3 658,56
	NO _x (g/kg)	0,42	4,84	5,26
	SO ₂ (g/kg)	0,04	0,25	0,28
	PM ₁₀ (g/kg)	0,01	0,19	0,20
Elektrisitet, Norsk Ecolinvent v.3	CO ₂ (g/kWh)	19,12		19,12
	CO ₂ -ekvivalenter (g/kWh)	25,67		25,67
	NO _x (g/kWh)	0,05		0,05
	SO ₂ (g/kWh)	0,10		0,10
	PM ₁₀ (g/kWh)	0,03		0,03
Elektrisitet, Norsk miks	CO ₂ (g/kWh)	-		-
	CO ₂ -ekvivalenter (g/kWh)	50,00		50,00
	NO _x (g/kWh)	-		-
	SO ₂ (g/kWh)	-		-
	PM ₁₀ (g/kWh)	-		-
Elektrisitet, Nordisk miks	CO ₂ (g/kWh)	-		-
	CO ₂ -ekvivalenter (g/kWh)	200,00		200,00
	NO _x (g/kWh)	-		-
	SO ₂ (g/kWh)	-		-
	PM ₁₀ (g/kWh)	-		-
Elektrisitet, Europeisk miks	CO ₂ (g/kWh)	-		-
	CO ₂ -ekvivalenter (g/kWh)	542,00		542,00
	NO _x (g/kWh)	-		-
	SO ₂ (g/kWh)	-		-
	PM ₁₀ (g/kWh)	-		-
Elektrisitet, Anbudskrav	CO ₂ (g/kWh)	-		-
	CO ₂ -ekvivalenter (g/kWh)	75,00		75,00
	NO _x (g/kWh)	-		-
	SO ₂ (g/kWh)	-		-
	PM ₁₀ (g/kWh)	-		-

APPENDIX C : UTFYLLENDE OM ENERGIEFFEKTIVISERINGSTILTAK (NORSK ENERGI)

C.1 EKSOSKJEL MED KRAFTPRODUKSJON

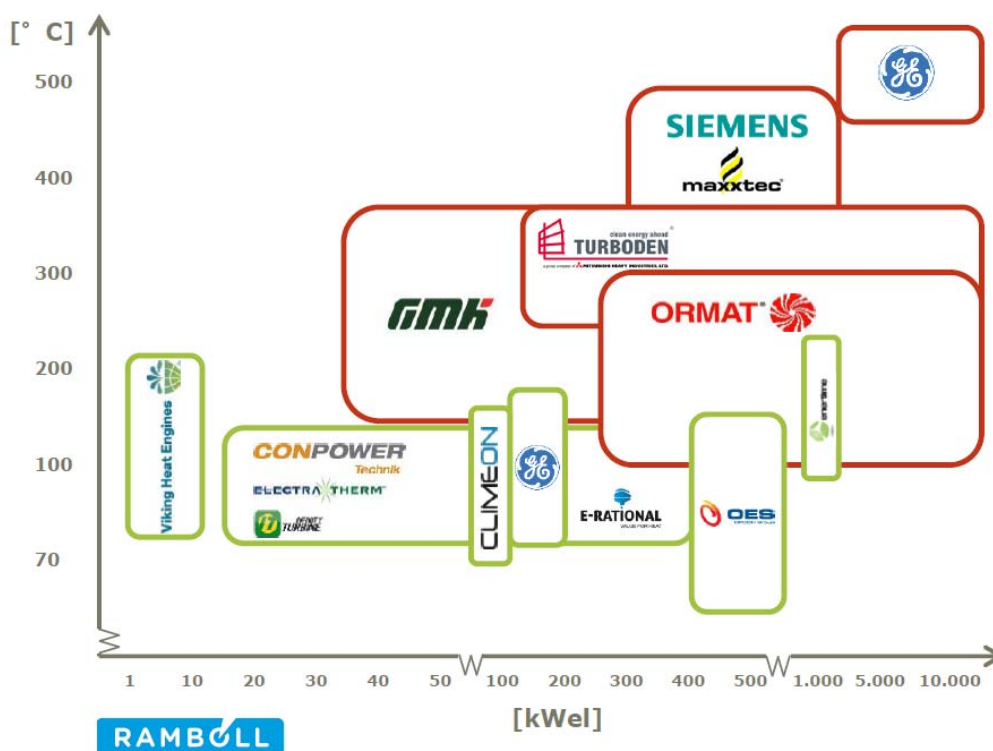
Omtrent 30 - 40% av tilført energi til forbrenningsmotorer forsvinner som eksosvarme. Denne energien kan gjenvinnes i en eksoskjel å brukes til å dekke ferjens varmebehov eller konverteres til kraft for å dekke ferjens kraftbehov. Ferjenes varmebehov dekkes normalt i stor grad av varme fra kjølevannsystemet til hovedmotorene, men noen ganger er ikke temperaturnivået på motorkjølingen tilstrekkelig til å dekke varmebehovet uten tilleggsvarme fra en fyrkjel.

På grunn av eksosgassens relativt lave temperatur (350 - 400°C) er det termodynamiske potensialet (Carnot-virkningsgraden) for kraftproduksjon relativt begrenset. Det er derfor kun en liten andel (10 - 20%) av eksosvarme som potensielt kan konverteres til elkraft. For større systemer er det vanlig å benytte damp som varmemedium og generere kraften i en dampturbin. Det finnes flere referanser på slik bruk for større fartøy i marin sektor. Selve dampkjelen er hyllevare for alle relevante størrelser, men for kraftproduksjon lavere enn 1 MW er det mindre vanlig å benytte dampturbiner. Et alternativ er da å bruke ORC (Organic Rankine Cycle), Stirling, eller annen tilsvarende teknologi. Det finnes flere leverandører Viking Engines, ToCycle, Singe-Phase Power, etc. som tilbyr slik teknologi. Disse teknologiene har ulik modenhet, potensial og virkningsgrad, men felles for de fleste er en relativ høy kostnad per kW installert (10 000 - 30 000 NOK/kW).

Rambøll presenterte på Enovakonferansen 2015 en oversiktsstudie over mulige teknologier og potensial. Link:
http://enovakonferansen.enova.no/upload_images/D0D999ADB1C2461F8A3C94FCC1E18D63.pdf

Teknologien er egnet for alle drivstoffkombinasjoner med forbrenningsmotorer og kan gi en forbedring på totalt drivstofforbruk på 3 - 5 % avhengig av implementeringsgrad og teknologivalg.

ORGANIC RANKINE CYCLE TEKNOLOGILEVERANDØRER



Figur C.1 - Oversikt over teknologileverandører for elkraftproduksjon fra eksosgass. (Rambøll 2015)

C.2 VENTILASJON:

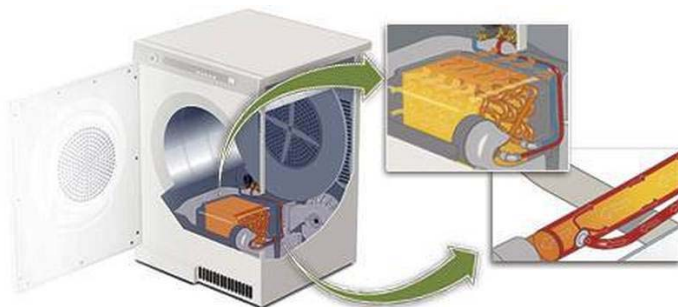
Utover selve fremdriftssystemet er ventilasjonssystemet er potensielt stor bruker av energi. Ventilasjonssystemet skal sikre riktig temperatur og luftkvalitet i publikumsarealer og mannskapsområdene. I moderne anlegg bør sirkulasjonsvifter være frekvensregulerte og styrte mot minimum luftutskifting og f.eks. CO₂-innhold i avtrekksluften. Man bør unngå bruk av elkraft til komfortkjøling eller -oppvarming. Kjøling kan i all hovedsak dekkes av ferjens interne sjøvannskjølekrets og varme fra motorens varme kjølevann, eventuelt fra eksoskjel. Dersom ferjens kjølevannssystem benyttes som kilde til oppvarming og kjøling blir primærenergibehovet (gass/diesel) nesten eliminert. Tiltaket er aktuelt for nybygg og større ombygginger/rehabiliteringer av eksisterende ferjer.

C.3 ENERGIBESPARENDE KJØKKENUTSTYR OG HVITEVARER

Det pågår betydelig innovasjon innenfor bruk av fjernvarme/varmtvann til drift av tørketromler, vaske- og oppvaskmaskiner og andre hvitevarer. Et eksempel er det store EU-prosjektet Celcius⁴⁹, et initiativ innen Smart Cities, som ledes av Gøteborg Energi og Gøteborg Stad. Ved å bruke skipsmotorenes spillvarme direkte reduseres kraftforbruket til oppvarming av vann og pådraget på ferjenes generatorsett kan reduseres. Gitt generatorsettets sin virkningsgrad vil en reduksjon med

⁴⁹ <http://celciuscity.eu/>

1 kWh gi 2,5 - 3 kWh redusert gass/diesel-forbruk. Av samme grunn vil valg av høyeste energiklasse bidra til redusert samlet kraftbehov og derfor redusert drivstofforbruk.



Figur C.2 - En varmeveksler overfører fjernvarmen til hvitevarene. I tørketrommelen varmes luften med en varmevekslerpakke istedenfor elektrisitet. (Illustrasjon: Askø)

C.4 ENERGILEDELSE OG ENERGIOPPFØLGINGSSYSTEM

Det er en vanlig antakelse at man kan redusere energibehovet med 5 - 10% gjennom måling av energiforbruk og systematisk oppfølging av identifiserte avvik. Energiledelse innebærer at alle ansatte i virksomheten setter seg et felles mål og etablerer energimåltall som man kan følge opp og måle seg mot. Etablering av en energipolitikk og energimål bidrar til å holde fokus på energieffektiv drift over tid. Eksempler på målinger som bør måles og logges er:

- Diesel/gassforbruk
- Virkningsgrad for generatorene
- Lastkurver
- Strømforbruk til hotelldelen
- Overfartstid og antall passasjerer
- Utetemperatur og vind (retning og hastighet)

Målingene bør være online og tilgjengelige for alle ansatte. Basert på målingene kan man definere energiytelsesindikatorer. Eksempler på dette kan være:

- Diesel/Gass/El.-forbruk per overfart, dag, uke, måned.
 - Mulige justeringsfaktorer er f.eks. vind- og bølgeforhold
 - Snitthastighet for overfarten
- Strøm/samlet energiforbruk til hotelldelen
 - som funksjon av utetemperatur
 - som funksjon av antall passasjerer
- Samlet kraftforbruk (eksklusiv framdrift) per overfart, døgn, uke, måned

Energiledelse og måling av energibruk vil gi besetningen verdifull innsikt i hvordan parametere som overfartstid, værforhold, antall passasjerer, etc., påvirker energiforbruket i normal drift og bidra til å fange opp negative trender tidligere. Slik måling vil også gi verdifull innsikt ved utskifting av materiell og utstyr.

C.5 BELYSNING

GLØDELAMPE ARMATURER

- 1) Bytte til sparepærer. Gir 80% besparelse men dårligere fargegjengivelse. Middels levetid.

- 2) Bytt til LED m/skrusokkel. 80% besparelse og lang levetid men dårligere fargegjengivelse.
- 3) Bytt til halogen m/glødelampeform. 50% besparelse og nesten like bra som glødelampe på farge. Levetid omtrent som glødelampe.
- 4) De fleste glødelampearmaturer har dårlig virkningsgrad og bør byttes.

LYSRØR ARMATURER

- 1) 80-talls lysrørarmaturer byttes til nye T 5 eller LED armaturer. Gir 50 - 70% besparelse
- 2) Besparelsen er både på forkobling, reflektor og lyskilde.
- 3) Husk at det finnes mange fargekvalitet på lysrør. De billigste standardrørene har 51% gjengivelse mens det finnes lysrør for grafikere på 98%.

HALOGEN ARMATURER

- 1) Bytte til LED spotter gir 60 – 70% besparelse og ingen varmestråling men litt dårligere fargegjengivelse.
- 2) Bytte til metallhalogen gir 50% besparelse og samme fargekvalitet.

(Kilde: <http://www.orkideportalen.no/files/dmfile/Belysningogenergibruk.pdf>)

Karakteristikk	Glødelamper		Lysstoff/Spærper		Høyintensitet			LED
	Lyspærer	Kvartshalogen	Lysstoffrør	Kompaktrør	Damplampe (Høyintensitets)	Metallhalogen	Høytrykksnatrium	
Installasjonskost	Lav	Lav	Lav	Lav	Medium	Medium til høy	Medium til høy	Høy
Ytelse (Lumen/Watt)	Lav (8-17)	Lav (20-30)	Medium til høy (60-100)	Medium til høy (40-65)	Lav til høy (15-70)	Høy (60-100)	Høy (80-100)	Høy (20-120)
Driftskostnader	Høy	Høy	Medium til lav	Medium til lav	Høy til medium	Medium til lav	Lav	Lav
Levetid (Timer)	Kort (> 1000)	Kort (2000 - 4000)	Medium (6000 - 8000)	Medium (6000 - 8000)	Medium til lang (6000 - 24000)	Medium (8000 - 10000)	Lang (14000 - 24000)	Lang (50000 - 100000)
Kostnad ved utbytting	Lav	Medium	Lav	Medium	Lav	Høy	Høy	Høy
Fargegjengivelse (Ra)	Utmerket 100	Utmerket 100	Medium til bra (50-98)	Medium til bra (50-80)	Dårlig (15-50)	Medium til bra (60-90)	Dårlig (17-25)	Bra til utmerket (80-95)
Bruksområder	Områder hvor belysning er på i korte perioder. Oppgavebelysning for roterende maskineri, eller i områder hvor fargegjengivelse er viktig.	Små reflektorlamper kan brukes til spotbelysning. Lineære høyvattlamper kan brukes til sikkerhetsbelysning hvis de styres av en bevegelssensor.	Områder hvor belysning er på i lange perioder, og takhøyden er under fem meter. Utendørsbelysning for små områder.	Erstatter lyspærer i egnede områder. Belysning i små rom hvor lyse er på i lange perioder.	Utendørsbelysning og belysning i fabrikker og lagerhus hvor fargegjengivelse ikke er viktig. Høytrykksnatrium er vanligvis et bedre valg.	Lobbybelysning, kontorbelysning og i butikker med takhøyde som overstiger fire meter.	Utendørsbelysning, kontinuerlig sikkerhetsbelysning og belysning i fabrikker og lagerhus hvor fargegjengivelse ikke er viktig og takhøyde overstiger fire meter.	Stemningsbelysning, oppgavebelysning og effektbelysning. Innfelt belysning og downlights. Flombelysning, utendørsbelysning, landskapsbelysning og parkeringsplasser. Lysfiksturer.

APPENDIX D : KLIMAGASSBEREGNING (SVV/TRANSNOVA)

Verdier for oppstrøms klimagassberegninger ferjereferansegruppa
Konrad Pütz, Transnova, April 2011

D.1 INNLEDNING

I anbudsutlysningen for miljø- og energieffektive ferjer⁵⁰ vil tilbydere konkurrere om å levere den mest energi og miljøeffektive ferjen. Både drivstofforbruk og utslipp vil vektlegges og ulike typer elektrisk drift og bruk av biodrivstoff kan være aktuelt. Kontrakten skal bidra til teknologiutvikling og både stimulere verfts og leverandørindustrien og bidra til at Norge når målene sine i klimapolitikken. Dette dokumentet er en beskrivelse av ulike innfallsvinkler til hvordan oppstrøms miljøkonsekvenser av energibruk kan beregnes. Beskrivelsen munner ut i en konkret anbefaling til hvilke prinsipper som bør legges til grunn ved vurdering av innkomne anbud og hvordan miljøkonsekvenser av energibruk vil beregnes. Valgene er påvirket av konkret kontekst: en anbudsutlysning der det skal bygges en ferje med lang levetid.

Vi har valgt å vurdere kun klimagassutslipp, og ikke vurdere oppstrøms utslipp av NO_x, partikler, SO_x med mer. Dette er hovedsak gjort for å redusere kompleksiteten i håndtering av innkomne tilbud og fordi det ikke er forventet at beregningene vil påvirke konkurranseflatene mellom de ulike framdriftsteknologier vesentlig. For eksempel ligger NO_x-utslippene fra nordisk elproduksjon på i underkant av 0,1 g/kWh – rundt en 1/100 av utslippskrav fra dagens skipsmotorer (IMO tier I og II), og rundt 1/20 av de krav som vil gjelde for nybygg fra 2016 i spesielle miljøkontrollsoner (ECA, IMO Tier III).

Ettersom utviklingskontrakten vil representere innovasjon på mange felt, og kun er et første skritt i en forhåpentligvis lengre rekke av utlysninger legges det vekt på å velge vurderingskriterier som er forståelige og akseptable, som er egnet til å gi forutsigbarhet, transparens og gode konkurransevilkår for de aktører og løsninger som blir tilbudt og som er håndterbare innenfor begrensede ressurser og tidsrammer for de som skal vurdere tilbudene.

D.2 PRINSIPPER FOR OPPSTRØMS VURDERINGER

Det hersker stort mangfold både i ulike fagmiljø og hos ulike interessenter om hvordan oppstrøms miljøkonsekvenser fra energibruk skal håndteres. Særlig har debatten vært omfattende for bruk av elektrisitet. Forskjellene skyldes at man kan velge blant et antall tilnærminger:

- marginal- eller gjennomsnittsberegninger eller beregninger i forhold til spesifiserte verdikjeder
- produksjonsperspektiv eller forbruksperspektiv
- tilbakeskuende miljørapportering (bokholderi) eller fremtidsrettet investeringsbeslutning (tiltaksanalyse/konsekvensutredning).
- hvilke systemgrenser skal velges? Skal man vurdere kun direkte utslipp fra produksjon av energibæreren eller også utslipp fra utvinning og produksjon av innsatsfaktorer? Mer komplette livssyklusanalyser (LCA) tar også med utslipp forbundet med bygging av nødvendig infrastruktur og utslipp relatert til overføring og transport.

⁵⁰ <http://www.regjeringen.no/nb/dep/sd/pressemeldinger/pressemeldinger/2010/Lyser-utviklingskontrakt-for-energi--og-miljoeffektive-ferjer.html?id=614807>

Bredden i tilnærminger fører til at klimakonsekvensene av bruk av strøm i ulike fora beskrives å ha fra rundt null utslipp (opprinnelsessertifikat vannkraft, produksjonssnitt Norge) til godt over 1000 g CO_{2EQ} pr kWt (kullkraft, marginalbetraktning). Det er lett å slå fast at det er vanskelig å peke ut noen klar "vinner" i denne debatten, men to konklusjoner kan trekkes:

- det finnes flere akseptable innfallsvinkler og beregningsmåter
- valg av metode bør påvirkes av beregningens målsetning og kontekst.

Det har i Norge tidligere vært vanlig å forutsette at norsk strømforbruk ikke fører til utslipp av CO₂, evt fører til svært lave utslipp, fordi vi stort sett har vært selvforsynte med vannkraftbasert strøm. SSB⁵¹ og transportetatene⁵² anbefaler eller anvender norsk elektrisitetsmiks ved virkningsberegninger og utslippsrapportering. Tilsvarende ser Klimakurs analyse bort ifra utslipp utenfor Norge og heller ikke Framtidens byer allokterer nødvendigvis utslipp til produksjon av elektrisitet eller bioenergi⁵³.

Andre problematiserer disse forutsetningene og diskuterer konsekvenser av å allokere null eller tilnærmet null utslipp til elektrisitet: Hvilke styringssignaler gis ved denne tilnærmingen? Hvor rimelig blir antagelsen ved stadig tettere markedsintegrasjon? Det finnes derfor i senere tid flere og flere publikasjoner som ser på andre markedsmikser enn det norske – og som argumenterer for å bruke framtidsscenarier framfor historiske øyeblikksbilder for klimagassberegninger knyttet til investeringsbeslutninger. Selvig argumenterer i forbindelse med oppdateringen av klimagassregnskap.no for å bruke en europeisk referansebane knyttet til at EUs klima og energipakke oppfylles når klimafotavtrykk fra byggeprosjekter skal beregnes⁵⁴. *Towards a Sustainable Nordic Energy System*⁵⁵ beregner utslippsbaner ved et antall ulike framtidssforutsetninger.

Forutsetninger og beregningsmetodikk vil i vår sammenheng i hovedsak tjene det formål å avklare konkurranseflater mellom ferjeløsninger basert på elektrisitet, biogass, biodiesel eller hydrogen og valg av metode bør derfor ikke bare være i rimelig samsvar med klimaberegninger gjort i andre sektorer av samfunnet, men også være konsistent på tvers av disse drivstoffene. Det er ingen enkel oppgave. Det foregår imidlertid mange spennende prosesser i Norge (og andre land) for å standardisere beregning av klimagassutslipp. Det må være et håp at metoder over tid skal konvergere og at vi får anslag som stemmer bedre over ens – selv om de fremdeles vil måtte variere avhengig av kontekst. Vi vil nedenfor gjennomgå de viktigste beregningsmetodene som er i bruk.

Marginalbetraktninger

er ofte foretrukket av økonomer og tar sikte på å modellere endringer i produksjons- og forbruksmønstre som følge av den "sist etterspurte kilowattimen". Ved vurdering av investeringsbeslutninger som genererer økt etterspørsel etter energi mener mange økonomer at miljøkonsekvensen av en etterspørselsøkning skal vurderes ut ifra nettopp egenskapene ved marginal produksjon. Marginalbetraktningene vil variere avhengig av om man ser på en situasjon med lav etterspørsel (natt: grunnlast) eller høy etterspørsel (dag: topplast), avhengig av sesong og

⁵¹ SSB (2008) Energiforbruk og utslipp til luft fra innenlandsk transport, Rapporter 2008/49

⁵² UTREDNINGSFASEN, NASJONAL TRANSPORTPLAN 2014-2023, Klimagassbudsjett

⁵³ SSB (2011) Byer og miljø. Indikatorer for miljøutviklingen i "Framtidens byer"

⁵⁴ Statsbygg/Civitas/Eivind Selvig 3.mars 2011: Utslippsfaktorer for elektrisitetsbruk. Hvordan er dette implementert i klimagassregnskap.no versjon 3

⁵⁵ Nordic Energy Perspectives 2010

i hvilket tidsperspektiv man gjør vurderingen. Vurderer man hvilken type kraftverk som momentant girer opp sin produksjon ved en kortsiktig etterspørselsendring – såkalt driftsmarginal - eller hvilket nytt kraftverk som bygges på grunnlag av en mer langsiktig etterspørselsøkning? Ettersom aktører som baserer sin produksjon på fornybare kilder og kjernekraft ofte har høye investeringskostnader men lave driftskostnader, vil disse produsentene stort sett produsere strøm så lenge vinden blåser eller sola skinner eller så man maksimerer profitten fra tilsiget til vannmagasinene. Den marginale produsent vil dermed stort sett antas å være den som baserer sin produksjon på kull- eller gasskraft, uavhengig av hvor stor fornybarandelen i kraftsystemet er.

Som en konsekvens av dette vil marginalvurderinger (så lenge man ikke tar EU's kvotetak for gitt) alltid beregne høye utslippsfaktorer for strømbruk. Selv om strømsystemet kontinuerlig forbedres og i snitt ofte leverer strøm med lavere klimagassutslipp enn gasskraft, vil marginalbetraktninger i liten grad påvirkes av denne endringsprosessen. Om beregningene tas til følge vil man dermed gi signal om, eller incentiver til at man ikke skal erstatte diesel med strøm. Den "ikke-marginale konsument" som bruker de økende mengder fornybar kraft som produseres er ikke synlig i regnestykkene som ofte domineres av egenskapene til de minst effektive teknologiene.

Det er ikke vanlig å anvende marginalbetraktninger på biodrivstoff, hydrogen eller oljeprodukter, der anvendes oftere snitt i definerte (ofte globale) markeder. Men marginalbetraktninger er mulige: For eksempel kan det beregnes at økt etterspørsel etter biogass fører til økt produksjon og forbruk av naturgass etc. En fremtidsrettet miljøsammenligning mellom fornybare energibærerne vil dermed kunne reduseres til en sammenligning mellom dagens fossile energibærere. Dette virker hverken særlig rimelig, hensiktsmessig eller forståelig for bransje og befolkning.

Kompleksiteten i tilnærmingen og følsomheten for det sett av forutsetninger som brukes taler også mot dette valget. For eksempel vil anslag sprike mye avhengig av hvordan man vurderer at EU's kvotetak vil påvirke markeder. NVE tar ikke hensyn til kvotetaket og konkluderer med at 1 - 10 TWh endring i eksport/import til Norge i dag medfører endringer i marginal kraftproduksjon i Europa tilsvarende en utslippsfaktor på om lag 600 g CO_{2EQ} pr KWt. Andre beregner 100% klimagevinst av å overføre energibruk fra sektorer som ikke er kvotepliktige (diesel brukt i transportsektoren) til kvotepliktig sektor (strømproduksjon) og argumenterer for at man innen Europa opererer med et velfungerende kvotemarked og et politisk bestemt kvotetak. Økt etterspørsel etter strøm vil dermed ikke ha noen utslippskonsekvens, bare en konsekvens for (økte) strøm- og kvotepriser og til styrkede incentiver for energieffektivisering, innovasjon etc. Andre igjen nyanserer mer og diskuterer konsekvenser av økt strømpris på substitusjon av annen fossil energibruk eller hvordan økte kvotepriser kan føre til økt karbonlekkasje – dvs. flytting av produksjon til land utenfor kvotesystemet. Nettovirkningen av dette både på kort og lang sikt er åpenbart vanskelig å beregne.

Gjennomsnittsbetraktninger

Gjennomsnittsberegninger kan enten være tilbakeskuende – basert på historiske data – eller fremtidsrettede scenariobaserte. Ved investeringsbeslutninger med lang levetid vil sistnevnte kunne ha mye for seg. Det må i så fall avklares hvilke markeder - norsk – nordisk – europeisk – globalt – man vil se på, hvilke tidsperspektiv man vil anvende og hvilke framtidsforutsetninger man vil legge inn. Selv om man i vår sammenheng kan hevde at det er naturlig å velge ferjens eller anbudets levetid, handler utviklingskontrakten om mer enn ett anbud, det handler om teknologiutvikling og langsiktige klimamål. Om det er åpenbart at de ulike energibærerne omsettes i forskjellige marked bør man kunne velge ulike markedssnitt for hver energibærer. Forskjellen mellom produksjonsbaserte og forbruksbaserte snitt ligger i at sistnevnte i tillegg til produksjonsutslipp innen et marked også beregner inn utslippskonsekvenser av import av strøm.

Siden det norske kraftmarkedet er godt koblet til det nordiske (både markedsmessig og fysisk) – men ikke det europeiske – finnes gode argumenter for å bruke enten norsk eller nordisk snitt. Valg av konkret fremtidsscenario vil kunne påvirke resultatene mye og spenner mellom business-as-usual-scenarier og scenarier som tar utgangspunkt i utviklingsbaner for å nå tograders utslippsmålet.

Konkrete verdikjedebetraktninger,

Verdikjedebetraktninger som tar utgangspunkt i beskrivelser av opphav og produksjonsform for de konkrete energibærere og drivstoff som vil anvendes i hvert anbud har en del fordeler. Ettersom det er stor variasjon i miljøegenskapene til de enkelte energibærere avhengig av hvor og hvordan de er produsert, vil anbudsbinding av miljøegenskaper sikre at ikke bare framdriftsteknologien, men også valg av produksjonsform og logistikk for energibæreren kvalitetssikres. Utlyser får dermed bedre kontroll over hele verdikjeden og utlysningen vil i større grad kunne bidra til at det skapes forbedringsincentiver ikke bare for ferje og framdriftsteknologien, men også for produksjon og distribusjon av energibæreren.

For noen energibærere finnes det særskilte markeder der energibærerens miljøegenskaper kan kjøpes og selges uavhengig av kjøp og salg av selve energibæreren. For elektrisk strøm finnes for eksempel et marked for opphavsgarantier for fornybar strøm, mens tilsvarende marked er ikke-eksisterende eller enda mindre utviklet for andre energibærere. Siden etterspørselen etter opprinnelsessertifikatene fremdeles er lav, har de lav pris og liten effekt på produksjons- og forbruksmønstre.

Innspill fra konsultasjonene

Referansegruppen har gjennomført konsultasjon med etablerte fagmiljø og mottatt innspill fra representanter fra transportetatene, SSB Klif, NVE, sentrale fou-miljø (Thema Consulting Group, UMB, Østfoldforskning), samt miljøorganisasjoner (Naturvernforbundet, FIVH, Bellona Europa, Zero og WWF). To aktører har ikke svart på henvendelsen. Konsultasjonen har vært uformell og representantene ble presentert for utviklingskontraktens målsetninger og kontekst og bedt spesifikt om å gi innspill blant annet på

- hvilken tilnærming (snitt/opprinnelsessertifikat/marginal) bør velge (og om relevant :produksjons eller forbruksbasert)?
- hvorvidt man kan velge ulike tilnærminger for ulike drivstoff?
- hvordan tidsperspektiv/levetid bør håndteres?
- hvorvidt tilnærmingen bør påvirkes av om det aktuelle drivstoffet er importert eller egenprodusert?

Vi fikk mange gode innspill i denne konsultasjonen og bekreftelse på at valg av tilnærming avhenger av konkret vurderingskontekst. Konsultasjonen ga ikke støtte for å beregne utslipp fra strømproduksjon fra europeiske produksjonssnitt eller marginalbetraktninger⁵⁶. Anbefalingene varierte mellom konkrete verdikjedebetraktninger (særlig miljøorganisasjonene), og fremtidsrettede gjennomsnittsbetraktninger – baserte på norsk eller nordisk snitt og både produksjons- og forbruksbasert. Noen understreket viktigheten av å basere anslagene på LCA-beregninger.

⁵⁶ Kun en respondent anbefalte marginalbetraktninger, men da som nullutslippsberegning med gitt kvotetak og allokering av null utslipp fra strømbruk.

Diskusjon og resultater

Vi vil her oppsummere diskusjonene for de enkelte energibærere og konkludere. Alle prosentsatser for klimagassutslipp refererer til referanseverdien for diesel i EUs Fuel Quality Directive på 302 g CO₂ekvivalenter pr kwt. Verdien inkluderer utslipp fra blant annet raffinering, men er intet fullstendig LCA-anslag, siden infrastruktur ikke regnes inn. Vi har for alle anslag nedenfor valg gjennomsnittsverdier for relevante markeder. Siden det er forventet relativt store utslippsreduksjoner i innen kraftproduksjon framover har vi valgt å justere klimagassutslippene fra strømproduksjon til forventninger i 2020. Tilsvarende justering er ikke gjort for de andre energibærerne hvor det ventet bare mindre teknologiske endringer. Nedenfor kommer en gjennomgang av de enkelte energibærerne.

Biogass

Marked

Komprimert biogass handles primært i lokale/regionale markeder, flytende biogass kan handles over større avstander. Biogass består i hovedsak av metan og kan i stor grad substituere og substitueres av naturgass ved bruk i ferjer.

Reduksjonspotensial

Ulike kilder spriker mye. EUs Fornybardirektiv og Fuel Quality Directive opererer med typiske tall i intervallet 80 - 85% for komprimert gass. Klif⁵⁷ har beregnet for konkret verdikjede for biogass til ferjer som erstatning delvis for fossilgass, delvis for diesel og opererer med et reduksjonspotensial på 370 g/kWt. Dette innebærer over 100% utslippsreduksjon (Fuel Quality Directive opererer med en referanseverdi på 302 g CO₂ekvivalenter pr kWt). 43% av dette skyldes reduserte utslipp pga forbedret håndtering av husdyrgjødsel og våtorganisk avfall (reduisert lystgass og metanlekkasje), 57% skyldes substitusjon av diesel. Ettersom økt etterspørsel etter biogass i en region kan utløse forbedret håndtering av avfall og gjødsel er det ikke urimelig å regne som Klif har gjort. Men rapporteringsgrunnlag spriker voldsomt og avhenger i stor grad av forutsetninger og lokale forhold. For eksempel har MISA gjort livssyklusanalyser for alternative behandlinger av husholdningsavfall fra Trondheim kommune og kommet fram til at biogassanlegg knapt har positiv effekt på global oppvarming sammenlignet med dagens behandling (=forbrenning) av avfallet⁵⁸.

Tidsperspektiv

Det er lite som tyder på at klimaeffekten i stor grad vil påvirkes av teknologiutvikling selv om tilgangen til biogass over tid kommer til å øke og produksjonskostnadene vil falle.

Referansebanen, dvs. hvordan husdyrgjødsel og avfallet ville blitt håndtert uten tiltaket, kan imidlertid endres over tid. I dag er referansen spredning på jorder for husdyrgjødsel og en blanding av kompostering og brenning for våtorganisk avfall.

Anbefaling og begrunnelse

Et klimareduksjonspotensial med utgangspunkt i EUs fornybardirektiv ligger i intervallet 80 - 85% og er relativt sentralt plassert blant anslagene referert ovenfor. I tillegg støttes det av et bredt datagrunnlag og anvendes i mange andre relevante prosesser og sammenhenger. Vår anbefaling til utslippsfaktor på **55 g/kWt** ligger midt i dette intervallet. Bokføring av null utslipp i tråd med

⁵⁷ Klif (2011) Biogass fra sambehandling av husdyrgjødsel og våtorganisk avfall. Kostnader og reduksjon av klimagassutslipp gjennom verdikjeden. TA 2704

⁵⁸ Misa (2011) Livsløpsvurdering av ulike alternativer for bruk av våtorganisk avfall Trondheim. Rapport 2/2011

Klif sine beregninger virker ikke hensiktsmessig, siden gassmengden på sikt er begrenset og i sine alternativanvendelser også ville redusert utslipp.

Biodiesel

Marked

Biodiesel handles på globale markeder, biodiesel som omsettes i Europa domineres av europeisk produksjon basert på raps.

Reduksjonspotensial

Fornybardirektivet opererer med 45% reduksjonspotensial for rapsbasert diesel og over 90% reduksjonspotensial for skogbasert annengenerasjons diesel. De fleste anslag ligger i størrelsesorden 40 - 60% reduksjon. Tallene ovenfor tar ikke hensyn til direkte og indirekte arealbruksendringer⁵⁹ og reduksjon av skogens karbonlager. Det er lite sannsynlig at skogbasert biodiesel vil være tilgjengelig i kommersielle mengder i 2015 - 2020.

Anbefaling og begrunnelse

Vi anbefaler bruk av 45% reduksjonspotensial (**utslipp på 165 g/kWt**). Dette anslaget er i tråd med fornybardirektivet og relativt konservativt. Men i og med at arealbruksendringer ikke inngår i anslaget bør det kreves at tilbyderer dokumenterer at biodieselen i bruk tilfredsstiller de til enhver tid gjeldende bærekraftskriterier.

Tidsperspektiv

Det arbeides med beregningsmodeller som også vil ta hensyn til indirekte arealbruksendringer, og disse vil, om de tas i bruk, redusere beregnede klimagassreduksjoner.

Det rapporteres en viss forbedringstrend for klimagassutslipp fra produksjon av rapsbasert diesel⁶⁰, men ingen vesentlige teknologigjennombrudd eller vesentlige utslippsreduksjoner kan forventes i et 2015 - 2020 perspektiv.

Elektrisitet

Marked

Elektrisitet i Norge handles på et fellesnordisk marked (Nasdaq OMX, tidligere Nord Pool ASA). Norge er markedsmessig og overføringsmessig godt forbundet med Norden, i mindre grad med et felleseuropeisk strømmarked, men sistnevnte kobling forbedres gradvis.

Reduksjonspotensial

Nordisk gjennomsnittsstrøm har i perioden 2002 - 2006 variert mellom 73 g/kWt og 138 g/kWt med et snitt på 107 g/kWt (produksjonsbasert)⁶¹, noe som tilsvarer en utslippsreduksjon på 65%

⁵⁹ Med direkte arealbruksendringer menes at ny produksjon av biodrivstoff tar i bruk landområder som de senere år ikke er brukt til landbruk. Med indirekte arealbruksendringer menes at ny produksjon av biodrivstoff fører til økt etterspørsel etter landarealer og at dette igjen fører til at arealer som i de senere år ikke er brukt til landbruk tas i bruk. Dette kan – særlig om karbonrike landområder som torv- og myrområder eller skogsområder konverteres – føre til negative klimaeffekter mange tiår fram i tid. Fornybardirektivet inneholder bærekraftskriterier for å unngå de alvorligste negative direkte arealbruksendringene, disse er foreslått implementert i produktforskriften i Norge.

⁶⁰ Se for eksempel BIODIESEL GHG EMISSIONS, PAST, PRESENT, AND FUTURE. A REPORT TO IEA BIOENERGY TASK 39, tilgjengelig her:
http://www.task39.org/LinkClick.aspx?fileticket=E5r1rznoEzU%3d&tabid=4426&bcsi_scan_3F596F6176A1DC74=5n43ZtJ3HJ+MirqcQ2JMFa0AAABakUwg&bcsi_scan_filename=LinkClick.aspx

sammenlignet med diesel. Scenarieanalysen⁶² Nordic Energy Perspectives, referert ovenfor sett på nordisk produksjonssammensetning framover under ulike forutsetninger. Om man forutsetter at de nordiske land vil oppfylle sine forpliktelser i henhold til EU's vedtatte energi og klimapakke vil utslippsintensiteten i strømproduksjonen 2020 reduseres med 38% sammenlignet med 2005.

Anbefaling og begrunnelse

Vi anbefaler bruk av produksjonsbaserte 2020 tall for nordisk gjennomsnittsstrøm. Dette vil gi et utslipp på **75 g/kWh**. Vårt anslag ligger noe under en del livssyklusbaserte anslag basert på blant annet Ecoinvent⁶³ og under anslag som beregner inn konsekvenser av import og eksport. Vårt valg er gjort av flere årsaker:

- Vi må tilstrebe konsistens mellom ulike tilnærminger og kan ikke velge LCA for strøm når vi ikke velger det for andre energibærere. For eksempel ligger vår referanseutslippsverdi for diesel 5 - 6% over rene forbrenningsutslipp, men godt under Ecoinvent's LCA-anslag.
- I en situasjon der valget har stått mellom bruk av nordisk elektrisitetsmiks og tilnærminger med lavere klimagassutslipp virker det fornuftig å unngå de høyeste anslagene for det valgte marked.

Anslagene for Nordisk elektrisitetsmiks varierer en del fra år til år og avhenger av vær og vind og ulike markedssituasjoner. Vi har valgt å basere vårt anslag på gjennomsnitt i scenariets referanseår (2005, 120 g/kWh). Valg av andre år ville gitt andre tall. Produksjonsbaserte tall ligger sentralt plassert i forhold til de aktuelle beregningsmetoder (utslippsfri vannkraft – norsk produksjonssnitt – norsk forbrukssnitt – nordisk produksjonssnitt – nordisk forbrukssnitt), tallet er enkelt å forstå og kommunisere sammenlignet med ulike typer marginal/modellberegninger og virker rimelig, sammenlignet med nullutslipp og europeiske snitt.

Andre drivstoff

Det kan komme anbud basert på andre energibærere, kanskje særlig brenselcellebaserte framdriftssystemer som går på hydrogen eller fornybar metanol. Det bør beskrives prinsipper for hvordan drivstoff som ikke beskrevet ovenfor vil beregnes.

⁶¹ Miljøvurdering av el. Marginal og medel. Underlagsrapport Statens Energimyndighet

⁶² Nordic Energy Perspectives 2010. Towards a Sustainable Nordic Energy System

⁶³ <http://www.ecoinvent.ch/>



Statens vegvesen
Vegdirektoratet
Publikasjonsekspedisjonen
Postboks 8142 Dep 0033 OSLO
Tlf: (+47 915) 02030
publvd@vegvesen.no

ISSN: 1893-1162

vegvesen.no

Trygt fram sammen