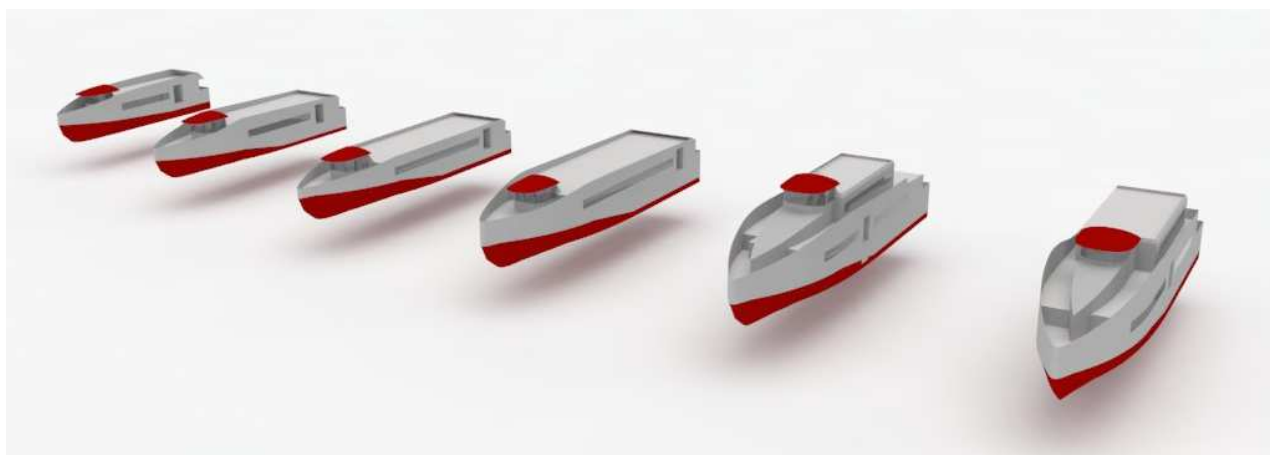


POTENSIALSTUDIE - ENERGIEFFEKTIV OG KLIMAVENNLIG PASSASJERBÅTDRIFT

OPPSUMMERINGSRAPPORT



**UTFØRT AV LMG MARIN, CMR PROTOTECH OG NORSK ENERGI
PÅ OPPDRAG FOR TROMS FYLKESKOMMUNE**

Dok. nr.: 359012-R-001
Revisjon: 03

Bergen, 10.01.2017

Kunde : TROMS FYLKESKOMMUNE

Nøkkelperson : LIV CECILIE EVENSTAD

Dokument tittel : POTENSIALSTUDIE - ENERGIEFFEKTIV OG KLIMAVENNLIG
PASSASJERBÅDRIFT

Prosjekt navn : OPPSUMMERINGSRAPPORT

Prosjekt nummer : 359012

Internt dokumentnummer : 359012-R-001

Ekstern distribusjon : FYLKESKOMMUNER

Gradering : INGEN

03	10.01.17	TB	FCO	TB	Diverse rettelser, spesielt alu vekt redusert
02	22.08.16	TB	FCO	TB	Oppdatert iht. kommentarer
01	03.06.16	TB	TMS	FCO	Første utgave, for kommentarer
Revisjon	Dato	Av	Sjekket	Godkjent	Kommentarer

INNHold

1. SAMMENDRAG -----	1
2. INNLEDNING -----	4
3. MÅLSETNING -----	4
4. ANVENDT TEKNOLOGI -----	5
4.1 ENERGIKILDER OG ENERGIBÆRERE	6
4.1.1 FOSSILT BRENSSEL	6
4.1.2 BIODRIVSTOFF	6
4.1.3 ELEKTRISITET FRA NETT	7
4.1.4 HYDROGEN	8
4.2 SKROGMATERIALER	8
4.2.1 ALUMINIUM	9
4.2.2 KARBONSANDWICH	9
4.3 SKROGKONSEPTER.....	11
4.3.1 ENKELTSKROG	12
4.3.2 KATAMARAN	13
4.4 PROPULSJONSLØSNINGER.....	13
4.4.1 VRIBAR PROPELL	14
4.4.2 VANNJETT	14
4.4.3 RORPROPELL MED KONTRAROTERENDE PROPELLER	15
4.5 MASKINERILØSNINGER, ENERGILAGRING OG ENERGIBÆRERE	16
4.5.1 DIESELMEKANISK FREMDRIFT	16
4.5.2 GASSDRIFT	17
4.5.3 BATTERIDRIFT	18
4.5.4 DIESEL/BATTERI HYBRIDDRIFT	19
4.5.5 HYDROGENDRIFT	20
4.6 GENERELLE ENERGIEFFEKTIVISERENDE OG KLIMAVENNLIGE TILTAK	22
4.6.1 TILTAK FOR SPART TIDSBRUK VED KAI	22
4.6.2 TILTAK FOR REDUSERT FREMDRIFTSEFFEKT	23
4.6.3 TILTAK FOR REDUSERT ENERGIFORBRUK TIL HJELPESYSTEM & HOTELL	24
4.6.4 TILTAK FOR REDUSERT MILJØBELASTNING	26
5. GENERELLE TRENDER OG RESULTAT -----	27
5.1 SKROGFORM.....	27
5.2 KARAKTERISTISK DRIFT OG DRIFTSPROFILER	28
5.3 VARIERENDE FART.....	30
5.4 VEKTFØLSOMHET.....	32
5.5 ENERGIEFFEKTIVISERINGSTILTAK	35
5.5.1 TERMINALTID	35
5.5.2 ALTERNATIVE PROPULSORER	36
5.5.3 TO SMÅ ELLER EN STOR	37
5.5.4 HOTELL-LAST FRA BATTERIER	38
5.6 KORT PENDELSAMBAND	39

5.7	LANG RUTE	41
6.	ANVENDT METODE, IDEALISERINGER OG ANTAGELSER -----	44
6.1	DATABASE	44
6.2	MOTSTAND, FREMDRIFT OG ENERGIUTNYTTELSE	44
6.2.1	SKROGMOTSTAND	44
6.2.2	FREMDRIFT	45
6.2.3	ENERGIUTNYTTELSE	46
6.3	DRIFTSPROFIL.....	47
6.4	SPESIFIKT BRENNSTOFF FORBRUK.....	48
6.4.1	FREMDRIFT	48
6.4.2	HJELPEMASKINERI	48
6.5	LETTSKIP OG DØDVEKT	49
6.5.1	LETTSKIP	49
6.5.2	DØDVEKT/NYTTTELAST	49
6.6	BRUKT TID I HAVN	49
6.7	BRUK AV LANDSTRØM	49
6.7.1	NORMAL LANDSTRØM	49
6.7.2	HØYKAPASITET LANDSTRØM	49
6.8	BRUK AV PROPULSJON I HAVN.....	50
6.9	TRAFIKKVARIASJON OVER DØGNET OG UKEN.....	50
6.10	UTNYTTELSE OG LADING AV BATTERI	50
6.11	GENERELLE TILTAK	51
6.11.1	TILTAK FOR REDUSERT ENERGIFORBRUK TIL HJELPESYSTEMER OG HOTELL	51
6.11.2	TILTAK FOR REDUSERT UTSLIPP	51
6.12	INVESTERINGSKOSTNADER.....	53
6.12.1	TRADISJONELLE FERGER	53
6.12.2	BATTERIFARTØY	53
6.12.3	HYDROGENFARTØY	53
6.12.4	PRIS PER STØRRELSE FARTØY	55
6.12.5	LANDSTRØM HØYKAPASITET	55
6.12.6	HYDROGEN BUNKRINGSANLEGG	55
6.12.7	GENERELLE TILTAK	55
6.13	ENERGIKOSTNADER	55
6.13.1	ANDRE BIODRIVSTOFF	56
6.13.2	HYDROGENPRODUKSJON VED VANNELEKTROLYSE BASERT PÅ FORNYBAR KRAFT	56
7.	BRUKERINSTRUKSJON – DIGITALT VERKTØY -----	58
7.1	DESCRIPTION	58
7.2	FERRY SHEETS	58
7.2.1	FERRY & ROUTE DEFINITION	58
7.2.2	SCHEDULE DEFINITION	60
7.2.3	RESULTS	64



APPENDIX A : BEGREPSFORKLARINGER -----	66
APPENDIX B : BIODRIVSTOFF NOTAT FRA NORSK ENERGI -----	72
APPENDIX C : HYDROGEN OG BRENSSELLETEKNOLOGI NOTAT FRA CMR PROTOTECH --	76
ULIKE BRENSSELLETEKNOLOGIER OG LØSNINGER.....	77
APPENDIX D : KLIMAGASSBEREGNING (SVV/TRANSNOVA) -----	91
D.1 INNLEDNING	91
D.2 PRINSIPPER FOR OPPSTRØMS VURDERINGER.....	91

1. SAMMENDRAG

Dette dokumentet er en oppsummering av en studie som kartlegger muligheter som finnes for energieffektiv og klimavennlig hurtiggående passasjerbåtdrift i Norge. 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 Troms Fylkeskommune (TFK) av LMG Marin med samarbeidspartnere CMR Prototech og Norsk Energi.¹

Studien omfatter hurtiggående (+20 knop) passasjerbåter i størrelse 50 til 300 passasjerer operert på typiske ruter langs kysten. Enkeltskrog og katamaran skrogkonsept av størrelse som vist i figur 1-1 bygget i aluminium eller karbonsandwich er undersøkt med kombinasjoner av følgende alternative maskineri-, energilager og/eller energibærerprinsipp:

- Dieselmekanisk fremdrift med bruk av konvensjonell diesel (referanse)
- Dieselmekanisk fremdrift med bruk av biodiesel
- Ren batterielektrisk drift
- Hydrogen brenselcelledrift



Figur 1-1: Fartøys type og -størrelse som omfattet av studien

Hybridløsninger som kombinerer diesel- og batteridrift er delvis utredet som del av studiet men foreløpig konkludert som mindre egnet av hensyn til relativt høy kompleksitet og tilhørende høye vekt og volumkonsekvenser for ellers kompakte og lettbygde hurtigbåt.

Tilsvarende for biogassløsninger. Maskineri, gasslager og gass-systemer som er tilgjengelig for maritimt bruk er generelt for voluminøst og tungt for hurtigbåter. Nøkkelen til å realisere gasdrift på hurtigbåter er at industrien introduserer mer kompakte løsninger.

Totalt er det utarbeidet en database på 72 ulike konsepter som gjennom studien undersøkes for ulike ruteparametere (fart, distanse, avgangsfrekvens med mer).

Utover dette vurderes generelle tiltak for energieffektivisering og/eller klimareduksjon som kan tenkes implementert på et vilkårlig hurtigbåtkonsept med hovedfokus på reduksjon av propulsjonseffekt da dette er den dominerende energiforbruker på hurtigbåter.

Noen trender som er observert:

- For hurtiggående passasjerbåter er energiforbruk til fremdrift i transitt den dominerende forbruker. Dette energiforbruket utgjør i typisk drift opp mot 97% av totalforbruk og resterende energiforbruk til hotell/hjelpesystemer og manøvrering er dermed nærmest neglisjerbar. Et viktig miljø- og klimatiltak for hurtigbåter er derav energieffektiv operasjon i form av tiltak som basert på ønsket rutefrekvens er med på å holde transittthastighet så lav som mulig.

¹ LMG Marin, CMR Prototech og Norsk Energi er samtlige tilknyttet den maritime klyngen NCE Maritime CleanTech

- Biodieseldrift er det eneste av de vurderte maskineri/energilagere/energibærere prinsipp som kan tenkes innført uten at det kreves tiltak for å tilpasse driften i form av redusert fart, større båt, lengre liggetid etc.
- En tradisjonell hurtigbåt er et optimalisert konsept som er svært følsom for vektøkninger. Energiforbruk øker dramatisk om fartøyets vekt blir for høy. Ny klimavennlig teknologi for batteri- eller hydrogendrift medfører betydelig vektøkning og anses mest relevant for hurtigbåter i kombinasjon med tilpasning av driften i form av redusert fart for å redusere installasjonens størrelse.
- Batteri- og hydrogendrift krever begge en elektrisk fremdriftsløsning samt batterier og/eller hydrogen brenselceller og hydrogenlager. I tillegg til høyere vekt enn tradisjonell dieselmekanisk løsning medfører dette også et større behov for maskinerirelatert areal og volum i fartøyet. Økt størrelse på fartøy enn ellers nødvendig er aktuelt rett og slett for i tillegg til nyttelast å ha bæreevne og plass til det aktuelle utstyret som skal om bord.
- Karbonsandwich som skrogmaterial er om en kun vurderer energieffektiviseringshensyn å foretrekke fremfor aluminiumslegeringer da førstnevnte medfører en vektgevinst for fartøyet totalt sett på opp til 15% (lettskipsvekt).
- Enkeltskrogsfartøy er i vår sammenligning funnet mest energieffektiv for mindre fartøy og opp til passasjerkapasitet på 200 PAX, mens katamaran er mest energieffektiv for de aller største fartøyene som er undersøkt (250 og 300 PAX).
- Av nullutslippsløsninger (batteri og hydrogen) er batteriløsninger beste klimavennlige alternativ for relativt korte pendelruter, mens hydrogenløsning er beste alternativ for lengre ruter med eller uten mellomstopp. Hydrogen bidrar til rekkevidde som ikke er praktisk mulig å oppnå med batteri.
- En batterielektrisk løsning som foreslått kan bli økonomisk attraktiv sammenlignet med dagens dieseldrift for relativt korte «pendelsamband». Selv om investeringskostnad for batterielektrisk fartøy er høy kan dette bli mer enn kompensert for av redusert energiforbruk og lavere energikostnader over normal anbudsperiode.
- Hydrogenalternativet kommer ut som dyreste løsning og lider spesielt under forutsetning om at eget hydrogenproduksjonsanlegg dedikert kun for dette formål er inkludert i kostandene. Per i dag finnes ikke hydrogenproduksjon tilgjengelig hvor flere forbrukere kan dele på kostnadene.
- Hydrogendrift har dersom en inkluderer energi som medgår til hydrogenproduksjon lavere energieffektivitet enn dagens tradisjonelle dieseldrift men gir med hydrogenproduksjon basert på elkraft fra nordisk miks likevel lavere CO₂ utslipp enn biodieseldrift.

Batterielektrisk drift kan spesifiseres som nullutslippsløsning for egnede ruter, men anbefales da gjennom spesielle anbudsrutiner som eksempelvis konkurransepreget dialog. Hydrogendrift er per i dag ikke modent som alternativ i en anbudsprosess, men krever eget pilotprosjekt for verifisering av teknologien for hurtiggående passasjerbåttransport. Det anses som hensiktsmessig at hydrogenteknologi først prøves ut på tradisjonelle skip som eksempelvis ferger, og deretter for hurtigbåter.

Hurtiggående passasjerfartøy godkjennes av klaseselskap og flaggstat etter eget regelverk tilpasset denne fartøystype². Det anbefales direkte og spesifikk dialog med sjøfartsmyndigheter helt fra planleggingsstadiet av nye anbud for nullutslippsløsninger for å ivareta sikkerhetsaspektet og for å oppnå tilhørende myndighetsgodkjenning.

Beregninger i dette prosjektet viser at:

- Hydrogen og brenselceller kan fungere som et fullverdig energieffektivt alternativ for nullutslipp fremdrift av hurtigbåter
- 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 hoved kostnad – nødvendig med god infrastruktur
- Biometanol som drivstoff i brenselcelle representerer en mer kompakt løsning og er et mer håndterbart brennstoff som av disse grunner kan være godt egnet til hurtigbåter.

For å bringe hydrogen- og brenselcelleteknologi til et kommersielt nivå, og dermed utvikle et fullverdig lav- eller nullutslippsalternativ til dagens fossilbaserte energisystemer i hurtigbåter, vurderes det som avgjørende å etablere et fullskala demoprojekt.

Det er som del av studien utviklet et digitalt verktøy som kan brukes av oppdragsgiver til å studere en vilkårlig rute. Det digitale verktøyet baserer seg på en teoretisk database av hurtigbåtkonsepter som er utviklet til formålet. Databasen egner seg best til sammenligning av ulike konsepter i en gitt rute og anses lite egnet til å sammenligne et fartøy fra database med bygde fartøy med mindre en verifiserer at sammenligning er rettferdig.

² IMO High Speed Code

2. INNLEDNING

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

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 vinter til sommer 2016 for Troms Fylkeskommune (TFK) av LMG Marin med assistanse fra Norsk Energi og CMR Prototech som alle er bedrifter knytt opp mot den maritime klyngen NCE Maritime CleanTech. En revidert utgave (R03) hvor en i utgangspunktet for stor vektgevinst ved bruk av karbonsandwich fremfor aluminium er rettet opp i, ble utgitt i januar 2017.

3. MÅLSETNING

Målsetningen med potensialstudiet er som følger:

- 1) Identifisere aktuelle hurtigbåtkonsept (skrog/maskineriløsninger) og øvrige tiltak for energieffektivisering og redusert klimabelastning basert på teknologi som er eller antas i nær fremtid å bli kommersielt tilgjengelig for hurtiggående passasjerbåtdrift.
- 2) Identifisere energieffektiviserende og klimavennlig potensial for de ulike konsept og tiltak, for ulike typer hurtigbåtdrift og ruter. Potensial identifisert som faktiske energi/utslippsverdier 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 passasjerbåt 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 rute. I dette dokumentet gis også en brukerveiledning for det digitale verktøyet (ref. kapittel 7). Rapport og digitalt verktøy bør brukes sammen.

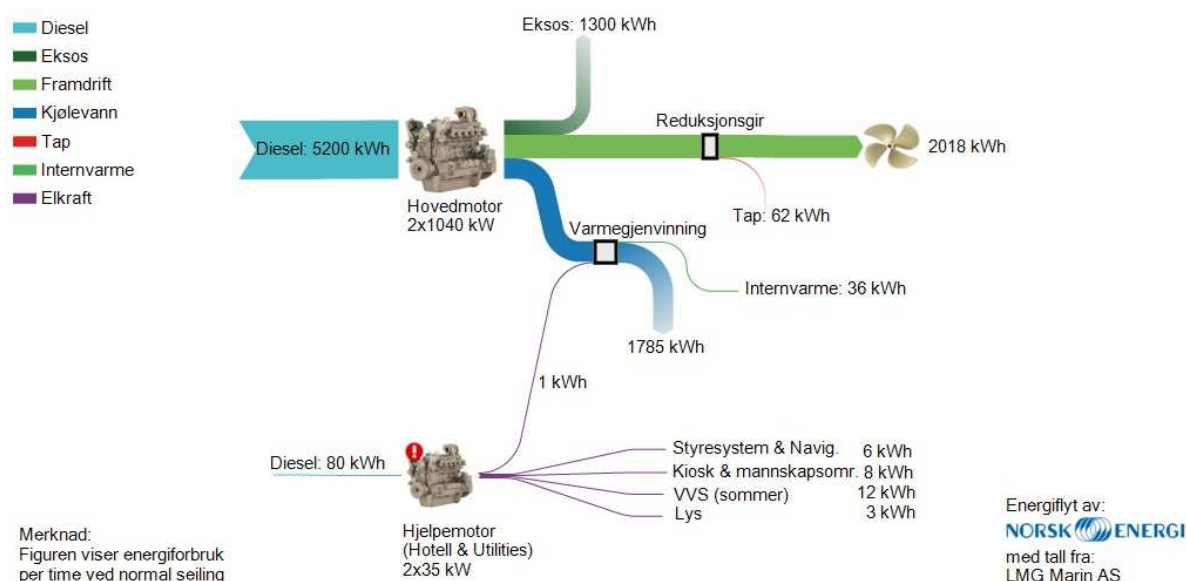
4. ANVENDT TEKNOLOGI

Teknologi som anvendt i dette studiet er presentert i påfølgende underkapitler, innbefattet en generell beskrivelse og dens potensial for energieffektivisering og redusert klimabelastning i hurtiggående passasjerbåtdrift (+20 knop). Hensikten er å gi bruker en overordnet forståelse av aktuell teknologi og dens potensial i hurtiggående passasjerbåtdrift, 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 ruter og båtdrift. Prinsippet er som følger:

- Alternative skrogkonsept undersøkes i kombinasjon med alternative maskinerikonsept og energibærere/energilagre.
- 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 dieselmekanisk propulsjonsløsning vist i figur 4-1 nedenfor (tradisjonell løsning for hurtigbåter).



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

4.1 ENERGIKILDER OG ENERGIBÆRERE

Energikilder og energibærer som er mest aktuell for hurtiggående passasjerbåtdrift er beskrevet i påfølgende underkapitler.³⁴

4.1.1 FOSSILT BRENSSEL

Det finnes en rekke ulike fossile brensel som kan tenkes anvendt, men det er kun lavsvovel marinediesel som per i dag anvendes til hurtiggående passasjerbåtdrift. Naturgass anses lite aktuelt da dette drivstoffet krever stort og voluminøst maskineri og brennstoff lagringssystem som ikke er egnet for hurtigbåter.

Lavsvovel marinediesel: Ved forbrenning i en typisk hurtigløpende motor for båtdrift produseres rundt 650 – 700 gCO₂/kWt.⁵ CO₂ utslipp kommer direkte av karboninnhold i drivstoff men spesifikt 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.⁶

4.1.2 BIODRIVSTOFF

Biodrivstoff er regnet som klimavennlige energikilder da de anses som CO₂ nøytrale. Karbon i dette brennstoffet regnes som en del av eksisterende mengden som finnes i naturens kretsloop. 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, bioetanol, biometanol med mer, men utover beskrivelser gitt i dette kapittelet vi vil kun berøre førstnevnte i dette studiet. Ytterligere utredning er gitt av vedlegg B.

Biodiesel: Det finnes en rekke alternative typer biodiesel med varierende ekvivalent CO₂ utslippsnivå avhengig av nødvendig medgått energi til produksjon av drivstoffet. For biodiesel regnes i dette studiet og med basis i vedlegg D et ekvivalent CO₂ utslipp på 165 gCO_{2EKV}/kWt. NO_x utslipp antas å være det samme som for konvensjonell diesel. Seneste produkter av biodiesel (2. generasjon biodiesel) markedsføres for 100% biodieseldrift i moderne hurtigløpende motorer.

Biodiesel kan produseres med både første og andre generasjons teknologier. Biodiesel kan enten produseres gjennom transesterifisering (1. generasjon) av vegetabiliske oljer, eller gjennom gassifisering med påfølgende Fischer-Tropsch syntese (2. generasjon). Mange forskjellige produkter kan brukes i produksjonen av biodiesel, bl.a. kokosnøtt, soyabønner, alger, solsikkeolje, palmeolje, rapsolje, fiskeoljer og organisk avfall.

Eco-1 2G Marine er en form for biodiesel som har veldig like egenskaper som 2. generasjons biodiesel, og er tilgjengelig på det norske markedet. 2G Marine produseres ved hydrogenering av vegetabiliske oljer basert på avfall og restfraksjoner, og kan brukes direkte uten tiltak på en rekke

³ Utslippsdata i form av CO₂ og ekvivalente CO₂ tilknyttet de ulike energibærere og energikilder hentes fra SVV data som benyttet på fergeanbud med miljøkrav, se vedlegg D.

⁴ CO₂ utslipp relatert til produksjon av hurtigbåter og tilhørende maskineriutstyr er ikke hensyntatt i denne studien, heller ikke for destruering, men kun CO₂ produsert fra selve hurtigbåtdriften.

⁵ Eksempel: Dieselmotor med gjennomsnittlig forbruk i båtdrift på 210 g/kWt og diesel med CO₂-faktor på 3,21 gram CO₂/gram diesel medfører 673 gCO₂/kWt.

⁶ NO_x utslipp kommer av oksygen og nitrogen fra luften som binder seg i forbrenningsprosessen, spesielt ved kombinert høyt trykk og høy temperatur.

dieselmotorer. Det har vært vanskelig å finne eksakte data for Eco-1 2Gs egenskaper når det gjelder utslipp, men Eco-1 hevder selv at sammenlignet med konvensjonell diesel vil bruk av 2G Marine redusere utslipp av klimagasser med 83%. I dette ligger det også at partikkelutslipp reduseres med 33%, CO-utslippene med 24%, HC-utslipp med 30%, og NO_x-utslipp med 10%.

Biometanol: Biometanol, tradisjonelt kalt tresprit, er som navnet tilsier, en alkohol basert på trevirke. Produksjonen av metanol er en industriell prosess og per tid produseres metanol vanligvis av naturgass. Metanol kan også baseres på biomasse, og det er denne biomassebaserte metanolen som er relevant for denne studien.

Utslippsmessig har metanol en bra profil sammenlignet med tradisjonelle drivstoff. Når metanol er basert på biomasse vil det ved forbrenning være CO₂-nøytralt. Metanol vil i tillegg ikke ha utslipp av SO₂, og sterkt redusere utslipp av NO_x.

Bruken av metanol som marint drivstoff er nesten uprøvd, og per tid står det svenske rederiet Stena og et samarbeid mellom det norske Westfal-Larsen og svenske Marininvest shipping i front når det gjelder utprøving av metanol som drivstoff. Metanolen som brukes her er etter all sannsynlighet naturgassbasert, men rederiene vil kunne legge om til biomassebasert metanol på et senere tidspunkt. Bruk av metanol som drivstoff krever en dual fuel motor eller brenselcelle.

Bioetanol: Etanol er som metanol en type alkohol, og er den alkoholen som finnes i drikkevarer som øl, vin og brennevin. Etanol produseres ved fermentering og/eller destillering. Bioetanol produseres med basis i biomasse, men deler ellers alle karakteristika med fossil etanol.

Bioetanol vil, som de andre drivstoffene inkludert i denne studien, redusere CO₂-utslipp betraktelig da CO₂'en som slippes ut har biologisk opprinnelse, og regnes som nøytral. Bioetanol vil i tillegg ikke ha utslipp av SO₂, men skiller seg fra de andre drivstoffene i denne studien ved at NO_x-utslipp ikke reduseres, og kanskje til og med øker.

Etanol som drivstoff er velprøvd i landtransport gjennom innblanding av etanol i bensin. E85 er for eksempel en blanding av 15% bensin og 85% bioetanol. I marin sammenheng er etanol som drivstoff er nærmest uprøvd. Ved bruk av ren bioetanol vil det kreves en dual fuel motor eller brenselcelle.

Etanol har litt høyere energitetthet enn metanol, men er likevel et drivstoff med betydelig lavere energitetthet enn tradisjonelle drivstoff. Da etanol gjennom forbrenningsmotor i tillegg har høye NO_x-utslipp at det vil være naturlig å tenke at det innføres NO_x-rensing. Det er ikke tilgjengelig infrastruktur for etanoldistribusjon, og dette vil også kreve investeringer. Ferge- og passasjerbåtsamband er gode utgangspunkt for slik utbygging, jf. LNG-utbygging for fergedrift.

4.1.3 ELEKTRISITET FRA NETT

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

Det felles nordiske elektrisitetsnett som en baserer seg på i dette studiet har en miks av energiprodusenter som tilsvarer et ekvivalent CO₂ utslipp på 75 gCO_{2EKV}/kWt, ref. vedlegg D.

Elektrisitetsnett i andre geografiske områder kan ha helt andre CO₂ utslipp, og kan i enkelte tilfeller medføre større klimabelastning enn dagens tradisjonelle hurtigbåtdrift. Men dersom en

utnytter elektrisitet fra en dedikert vannkraftkilde eller vindmøllekilde kan en oppnå nær nullutslippsløsning.

4.1.4 HYDROGEN

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. Norge er egnet for slik elektrolyse grunnet god tilgang på vannkraft, noe som har ført til at Norsk Hydro, nå videreført i NEL Hydrogen, er verdensledende på (alkalisk) elektrolysersteknologi. 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 komprimert gass, som flytende hydrogen (nedkjølt til -253°C) eller som metallhydrid, dvs. kjemisk bundet til metaller. Komprimert 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, noe som gjør at effektive systemer med relativt høy energitetthet kan designes ved å utnytte varme fra brenselceller (fortrinnsvis høytemperatur brenselceller). Samtidig er metallhydridteknologi i dag forbundet med høy pris og vekt, og derfor ikke ansett som aktuelt for passasjerbåter med større lagringsbehov. Grunnet høyere energitetthet enn komprimert gass vil flytende hydrogen kunne være aktuelt for hurtigbåter med høyt energibehov og begrenset plass til lagring. I Norge eksisterer det derimot i dag ingen anlegg for produksjon av flytende hydrogen. På kort sikt er derfor trykksatt hydrogen ansett å være det mest aktuelle lagringsalternativet for hydrogen til bruk i passasjerbåter.

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. Det er derfor identifisert et behov for å gjennomføre fullskala demoprojekt, for å opparbeide erfaring og hvor en parallelt vil kunne utvikle nødvendig regelverk og klassekrav som senere kan forenkle prosessen med godkjenning av nye hydrogendrevne fartøy.

For mer om hydrogenproduksjon, se kapittel 6.12.3.

4.2 SKROGMATERIALER

Det tradisjonelle skrogmaterialet for skip er stål, men for hurtigbåter er lav vekt essensielt for i det hele tatt å oppnå den ønskede farten. Av den grunn benyttes andre lettvekts konstruksjonsmaterialer som aluminium og plastkompositter. Aluminium er tradisjonelt det mest brukte skrogmateriale for hurtigbåter men spesielt her i Norge har plastkompositt i form av karbonsandwich tatt over en stor andel av markedet, først og fremst på grunn av

vektoptimaliseringspotensial. I denne studien er det kun aluminium og karbonsandwich som er vurdert, og disse er videre beskrevet i kapitlene nedenfor.

4.2.1 ALUMINIUM

Aluminium er tradisjonelt det mest anvendte konstruksjonsmaterialet for hurtigbåter. Dette er et metall som i seg selv er svært korrosivt i sjøvann men som også fås i sjøvannsbestandige legeringer. Aluminium koster mer enn stål både i materialpris og i bearbeiding men er likevel det rimeligste alternativet for hurtigbåter. Tradisjonell byggemetode er relativt arbeidsintensiv men krever lite av produksjonsfasilitetene og det er relativt mange verksteder som behersker bygging i aluminium.

Aluminium har en egenvekt på 2700 kg/m^3 mot 7850 kg/m^3 for stål. Spesifikk stivhet er 26 MPa/kg som er marginalt lavere enn stål (27 MPa/kg) men stål kan i praksis ikke utnyttes til samme nivå som aluminium da platetykkelser blir mindre enn det en i praksis kan anvende. Et aluminiumskrog vil typisk være 60% lettere enn tilsvarende i stål etter tradisjonell byggeteknikk.

Hovedskrog er normalt bygget opp med hud og tverrspant av sammensveiste plater og påsveiste langskips ekstruderte stivere. En slik konstruksjon er vist i figur 4-2 i stadiet før selve huden er sveist på (katamaran sideskrog vist opp-ned).

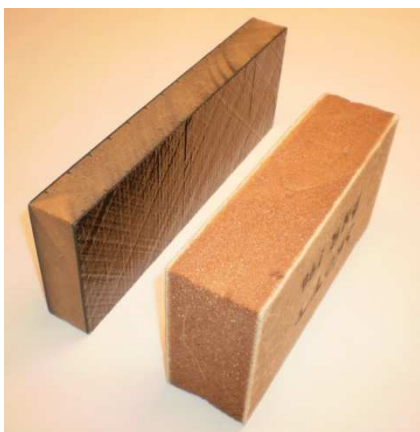


Figur 4-2: Aluminiumskrog, platespant og langskips stivere før hudplate legges på

Overbygget og spesielt områder uten kurvatur er gjerne bygget opp av ekstruderte panelprofiler som er langskips sammensveist etter tradisjonell metode eller ved friksjons sveising. I noen tilfeller benyttes også liming som sammenføyningsmetode for skott, bjelker og søyler. Fordelen med bruk av ekstruderte panelprofiler er at tykkelser og stiveravstander kan reduseres utover det som er praktisk mulig med platekonstruksjoner, og derav oppnå ytterligere vektreduksjoner.

4.2.2 KARBONSANDWICH

Karbonsandwich er det konstruksjonsmaterialet som har fått økt anvendelse for hurtigbåter. Dette er en plastkompositt med karbonfiberarmerte venylester-laminater limt på hver side av en PVC skumkjerne som vist til venstre i figur 4-3. Tidligere var glassfibersandwich (se figur 4-3 høyre side) komposittalternativet for hurtigbåter men med kvalitetsforbedring ved vakuuminjisering og reduserte priser for karbonfiber har karbonsandwich overtatt. Karbonsandwich koster mer enn aluminium både i materialpris og i bearbeiding men velges gjerne da redusert drivstoff forbruk over en viss driftsperiode kan kompensere for ekstrainvesteringen. Tradisjonell byggemetode er relativt arbeidsintensiv og krever spesielle produksjonsfasiliteter. Relativt få verksteder behersker bygging av karbonsandwich.



Figur 4-3: Vakuuminjisert karbonsandwich og håndopplagt glassfibersandwich

Karbonlaminater har en egenvekt på 1500 kg/m^3 mot 2700 kg/m^3 for aluminium. Spesifikk stivhet er typisk 47 MPa/kg som er betydelig høyere enn aluminium (26 MPa/kg) men det må i tillegg kompenseres for at karbonsandwich også inkluderer en PVC skumkjerne. Et karbonsandwichskrog vil typisk være 30% lettere enn tilsvarende i aluminium.

Skrog og hovedelementer er typisk støpt i en form, og paneler støpes på flate underlag. Materialene i form av karbonfiber ytterlaminat, PVC skumkjerne og karbonfiber innerlaminat bygges opp tørt og dekkes til med folie. Deretter påsettes vakuum som gjør at venylester kan injiseres inn og metter hele konstruksjonen. Etter herding har en da et ferdig skrog eller konstruksjonselement, og metoden heter vakuuminjisert formstøping. Figur 4-4 viser tørr oppbygging av innerlaminat og kjerne før ytterlaminat legges på (katamaran sideskrog vist opp- ned).



Figur 4-4: Karbonsandwichskrog, tørr karbonduk og delvis PVC kjerne på hannform

En hurtiggående passasjerbåt er et relativt enkelt utrustet skipskonsept hvor skrog utgjør betydelig andel av totalvekt (lettskip). Ved bruk av karbonsandwich kan en oppnå betydelig vektreduksjon sammenlignet med aluminium, opp mot 15% lavere lettskip for et helhetlig vektoptimalisert hurtigbåtkonsept (vektsreduksjon lavere dersom utrustningsvekt er høy). Redusert vekt gir grunnlag for å oppnå redusert skrogmotstand, og redusert energiforbruk til akselerasjon og retardasjon av fartøy (sistnevnte analogt med $\text{kraft} = \text{masse} \times \text{akselerasjon}$).

4.3 SKROGKONSEPTER

Det finnes en rekke ulike hurtigbåtkonsepter som vist i figur 4-5 nedenfor.



Figur 4-5: Ulike hurtigbåtkonsepter

Hydrofoil- og luftputekonsepser trenger begge høy fart (over 35 knop) for å være energieffektive, og dette er lite relevant for norske hurtigbåtruter⁷. I tillegg er slike konsepter svært vektfølsomme og dermed utfordrende å kombinere med ny og tyngre teknologi som batterier og/eller hydrogen.

Enkeltskrog- og katamarankonsepter er det som benyttes per i dag, de anses for å være best egnet for aktuelt driftsmønster og er derfor de to konseptene som en drar videre i studiet.

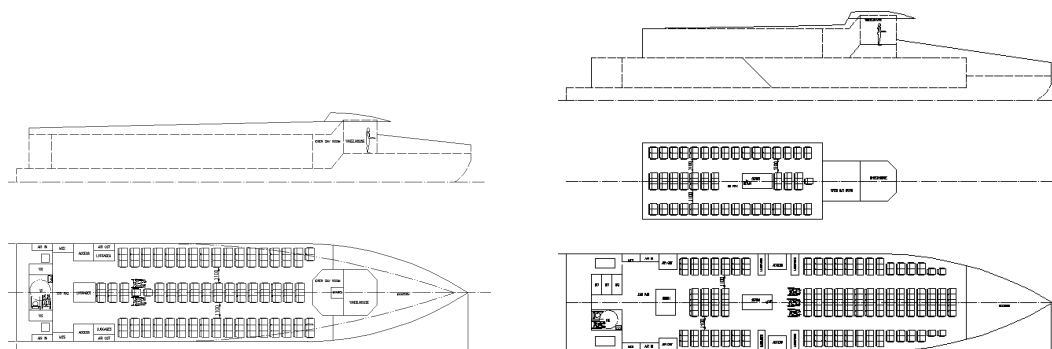
Trimaran er ikke utredet spesielt men antas ikke å medføre dramatiske forskjeller sammenlignet med enkeltskrog- og katamarankonsepter.

For fartøyskonseptene som vurderes og inkluderes i database er arrangert passasjersalong basert på det som anses mest hensiktsmessig og typisk for de ulike båtstørrelser. Alternative arrangement er:

- Passasjersalong på hoveddekk
- Hoved passasjersalong på hoveddekk og mindre salong på dekket over

Disse to alternative arrangementene er i prinsipp vist for enkeltskrogfartøy i figur 4-6. Katamaran med salong på hoveddekk er vist i figur 4-7.

Valgte arrangementer som funksjon av skrogkonsept og båtstørrelse fremgår av tabell 4-1 nedenfor.



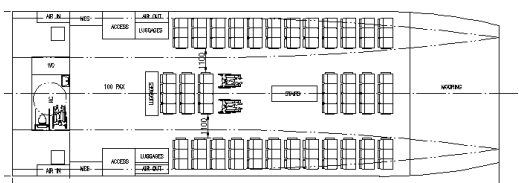
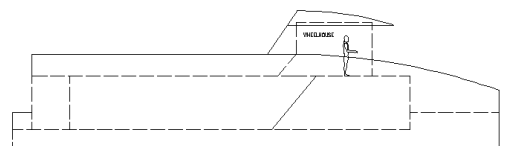
Figur 4-6: Alternative enkeltskrog båtarrangement (salong på ett og to deksnivå)

⁷ Selv med hydrofoil og luftputekonsepser vil energiforbruk ved høyere fart som f.eks. 40 knop øke dramatisk utover dagens hurtigbåt drift

Skrog	Arrangement	50 PAX	100 PAX	150 PAX	200 PAX	250 PAX	300 PAX
Enkelskrog	Enkel salong	x	x	x	x		
Enkelskrog	Dobbel salong					x	x
Katamaran	Enkel salong	x	x	x	x	x	x

Tabell 4-1: Anvendt arrangement i database som funksjon av båtstørrelse

Alle vurderte konsept er begrenset til rene passasjerbåter uten lastedekk eller bildekk i størrelse 50 til 300 passasjerer for å begrense arbeidets omfang.



Figur 4-7: Katamaran arrangert med enkel salong på hoveddekk

Vurderte skrogkonsept er presentert i påfølgende underkapitler.

4.3.1 ENKELTSKROG

For dette studiet inkludert database har en tatt utgangspunkt i en planende skrogform og markant kiming tilpasset propulsjonsløsning med to propulsjonsenheter av type vribar propell eller vannjett.⁸ Typisk skrogform er vist i figur 4-8.

Skrog har midtspant med markant V-formet bunnreis, skarp kiming og vertikale skipssider. Vannlinje karakteriseres av svakt stigende spiss V-form mot baug.



Figur 4-8: Typisk enkeltskrog

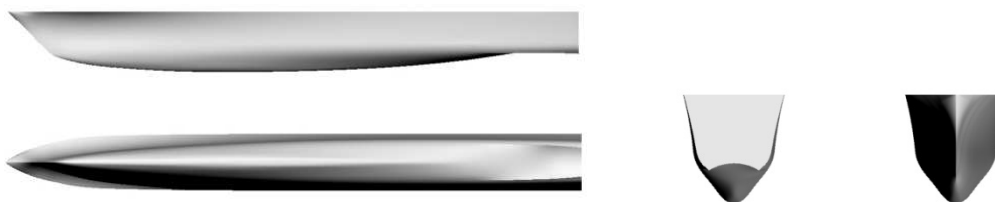
Skrogets lengde/bredde-forhold bestemmes med utgangspunkt i et fornuftig salongsarrangement, men et enkeltskrogskonsept blir nødvendigvis lengre og smalere enn en katamaran av samme kapasitet.

⁸ Antall propulsjonsenheter er satt til to per fartøy da enkel løsning av manøver- og redundanshensyn etc. normalt ikke benyttes.

Enkeltskrogkonseptet utnytter dynamisk løft og ligger høyere i vannet i fart. Konseptet er mest effektivt for mindre fartøy hvor dynamisk løft er relativt stort og relativ hastighet er høy. Konseptet er dog utsatt for bølgeslag og gir normalt redusert komfort sammenlignet med deplasementsskrog (som har avrundet form og uten dynamisk løft).

4.3.2 KATAMARAN

Et katamarankonsept utformes med slanke sideskrog som har tilstrekkelig innbyrdes avstand til å minimere interaksjoner dem imellom. Typisk katamaran skrogform som lagt til grunn for studiet og database er vist i figur 4-9.



Figur 4-9: Katamaran skrogform (1 av 2 sideskrog vist)

En katamaran har normalt lavere lengde/bredde-forhold enn en enkeltskrogsløsning men beholder samtidig slanke hydrodynamisk gunstige utformede sideskrog. Sideskrogene som vist er deplasementsskrog uten dynamisk løft som også gir myke bevegelser i fjordsjø.

Det oppnås med katamaran et gunstige salongarrangement og den økte bredden på baugene kan utnyttes til økt gangbrobredde og derav redusert på/avstigningstid dersom forholdene ellers tillater dette. Figur 4-10 nedenfor sammenligner dekkarrangement for 100 PAX fartøy basert på enkeltskrog- og katamarankonsept.



Figur 4-10: Typisk dekkplan, katamaran og enkeltskrog 100 PAX fartøy

En katamaran har større neddykket overflate (typisk +25%) og en høyere lettskipvekt (typisk +10%) sammenlignet med et enkeltskrogskonsept av samme byggemateriale og kapasitet.

4.4 PROPULSJONSLØSNINGER

Det finnes mange ulike propulsjonsløsninger men en begrenser seg i dette studiet til de mest anvendte til hurtiggående passasjerfartøy, som er:

- Propell med vribare blad og ror
- Vannjett
- Kontraroterende propeller med faste blad på rorpropell løsning (kun for mindre fartøy)

Alternativ som overflatepropell vurderes ikke da dette prinsipp kun er aktuelt for høyere hastigheter enn relevant for dette studiet. Tradisjonell propell med faste blad har relativt like egenskaper som alternativet med vribare blad men noe redusert funksjonalitet.

4.4.1 VRIBAR PROPELL

En vribar propell for hurtigbåt har relativt stor diameter, er arrangert i en halvtunell utformet i skroget, har en aksel som er opplagret på strømlinjeformede braketter og et relativt lite rør. En slik løsning er vist i figur 4-11.



Figur 4-11: Vribar propell i skrogtunell (kilde: Servogear)

Med denne løsningen kan bladene vris slik at reversering utføres uten reverseringsfunksjon på gir. Akselbraketter og rør gir tilleggsmotstand som må tas hensyn til. Rør kan ha relativt lite areal for å unngå stor tilleggsmotstand da høy hastighet og 2 reverserbare propellere likevel gir akseptabel styrekraft.

Et slikt anlegg oppnår høy virkningsgrad i transitt (opp mot 75%) og effektiv akselerasjon etter kombinatorkurve hvor motorturtall og stigning på propellblad øker parallelt. Løsningen er egnet og gir høy virkningsgrad i det aktuelle hastighetsområdet som vurderes i dette studiet, fra 20 til 35 knop. Av de vurderte alternativer er dette den mest energieffektive løsningen men krever at riktig designpunkt oppnås for å utløse sitt potensial og for å unngå uønskede vibrasjoner og materialtæringer.⁹

Det er få leverandører og en dominerende som tilbyr propulsjonsløsning med vribar propell tilpasset hurtigbåter.

4.4.2 VANNJETT

Vannjett er en løsning med fast impeller som er montert inne i en tunell i skroget, og hvor vannet tas fra bunn og blir akselerert gjennom en dyse for å generere skyvekraft (samme prinsipp som en hageslange). En vannjett leveres normalt inkludert tunell eller vanninntak som vist i figur 4-12.



Figur 4-12: Vannjett med vanninntak, styredyse og reverseringsspjeld (kilde: Rolls Royce)

⁹ Høyere fartøysvekt enn opprinnelig estimert gir typisk slike negative egenskaper.

En vannjett tar vannet inn i bunnen av skroget og selve vannjettdysen med impeller er montert på speilet. Et hydraulisk system med sylindre leveres med for å bevege styredyse og reverseringsspjeld som benyttes for å retningsstyre vannstrålen for manøverformål.

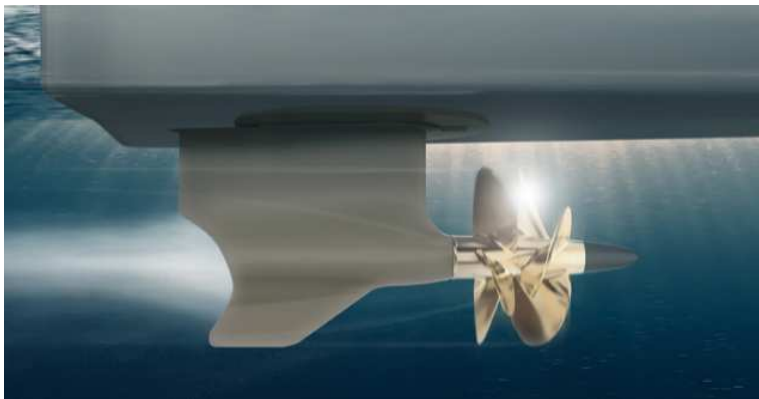
En vannjett er fullintegrert i skroget men vekt av vann i inntak og dyse må inkluderes fartøyets vekt ved beregning av ytelse.

En vannjett er best egnet til hastigheter fra 35 knop og oppover og oppnår i relevante hastigheter for dette studiet virkningsgrader opp mot 67%. Akselerasjonsegenskaper er noe dårligere enn vribar propell mens manøveregenskaper anses å være bedre. En vannjettløsning gir normalt lite utfordringer med vibrasjoner.

Flere leverandører tilbyr egnede vannjettløsninger.

4.4.3 RORPROPELL MED KONTRAROTERENDE PROPELLER

Et alternativ som er aktuelt for de mindre fartøyene som vurderes i dette studiet er en type rorpropeller med 2 kontraroterende faste propeller. En slik løsning er vist i figur 4-13.



Figur 4-13: Rorpropeller med kontraroterende faste og trekkende propeller (kilde: Volvo)

Løsningen inkluderer en pod med 2 stykk integrerte vinkelgir mellom motor og propell. Denne poden er strømlinjeformet og kan vris slik at den samtidig fungerer som ror til manøvreringsformål (også kalt rorpropell). Propellene er av såkalt trekkende type som står fritt i vannstrømmen foran poden.

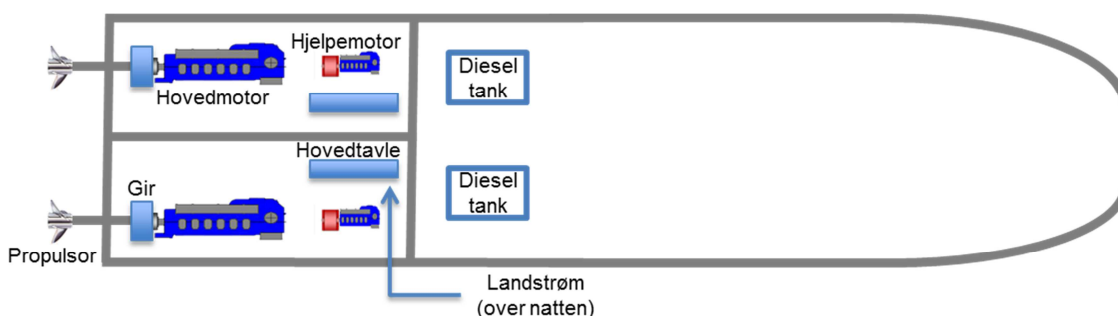
Produktet finnes i opp til 600 kW størrelse fra kun en leverandør.

4.5 MASKINERILØSNINGER, ENERGILAGRING OG ENERGIBÆRERE

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

4.5.1 DIESELMEKANISK FREMDRIFT

Et typisk dieselmekanisk fremdriftssystem for hurtiggående passasjerfartøy består av to fremdriftslinjer, hver med en hurtigløpende dieselmotor som er koplet til hver sin propulsjonsenhet via reduksjonsgir med kløtsj. Propulsjonsenhet er vannjett eller propell med vribare blad og ror. Prinsipielt er løsningen vist i figur 4-14 nedenfor.



Figur 4-14: Dieselmekanisk fremdrift prinsippkisse

For elektrisk kraftproduksjon til hjelpesystemer og hotell¹⁰ er det arrangert to små hurtigløpende diesel generatorsett (hjelpemotorer). Disse besørger elektrisk kraft i normal operasjon mens en over natten til kai benytter landstrøm via manuell tilkoping (kabel med plugg). Kraftbehov til hotell/hjelpesystemer er lavt sammenlignet med fremdrift.

Normalt utnyttes restvarme fra hovedmotorenes kjølevann til oppvarming av fartøyet (varmeveksling mot ventilasjonsanlegg) i kombinasjon med elektrisk oppvarming.

Beskrevne konsept er den tradisjonelle løsningen for hurtiggående passasjerfartøy 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 svovelinnhold i drivstoffet og begrenses til moderate mengder ved bruk av lavsvovel marinediesel¹¹. Noe NO_x reduksjon oppnås ved bruk av motorer sertifisert i henhold til IMO Tier II krav, men dette er motorinnstillinger som reduserer NO_x på bekostning av økt CO₂. NO_x kan ytterligere reduseres ved bruk av katalysator (som forbruker urea), men et slikt anlegg har begrenset effektivitet i dieselmekanisk drift.¹²

CO₂ utslipp kan for dieselmekanisk drift reduseres ved bruk av biodiesel (se kapittel 4.1.2).

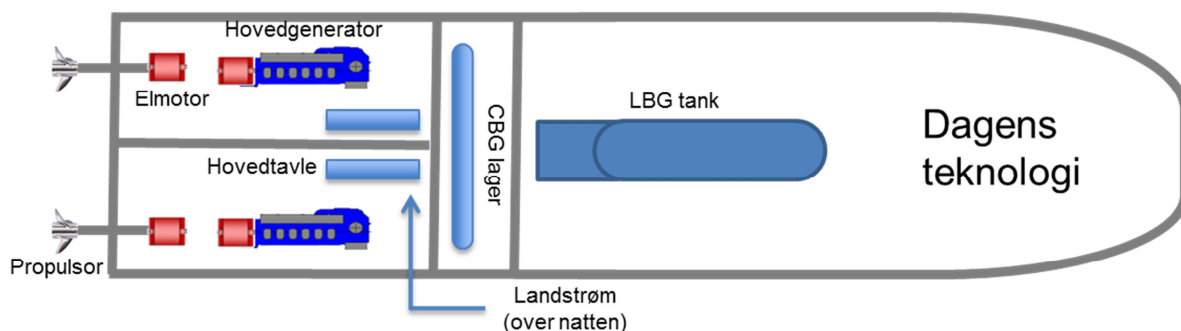
¹⁰ Hjelpesystem og hotell innbefatter energi som medgår til maskineri hjelpesystemer og mannskap/passasjer innredning, altså alt energibehov om bord i båten med fratrek av propulsjon.

¹¹ Svovelinnhold <500 ppm som normalt er absoluttkrav for denne type båt drift

¹² Kjennetegnet med stor variasjon i eksostemperatur og relativt lange perioder med lav eksostemperatur (katalysatoranlegg bør ha høy og jevn eksostemperatur for å yte best)

4.5.2 GASSDRIFT

Gasdrift med bruk av biogass kan i utgangspunktet synes å være en attraktiv løsning, men det er ikke rett frem å få til et godt maskinerianlegg for en hurtigbåt. Et aktuelt konsept for dette basert på dagens tilgjengelige produkter for maritimt bruk er som vist i figur 4-15 nedenfor.

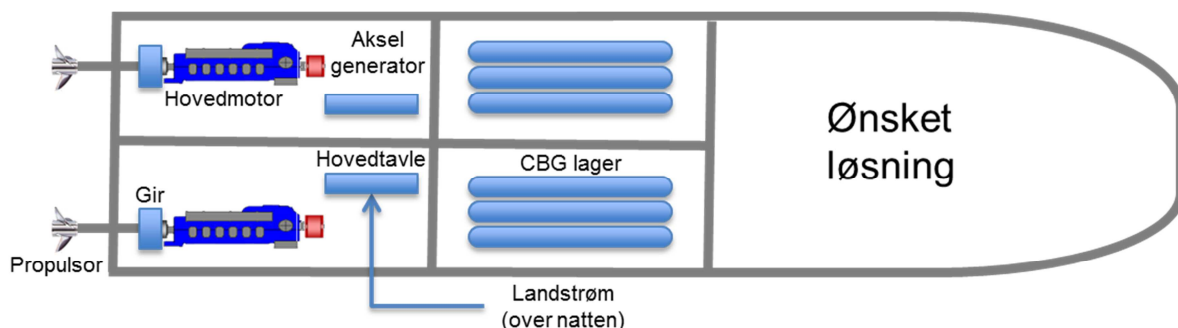


Figur 4-15: Gaselektrisk fremdrift prinsippkisse

I figur 4-15 er det vist en gaselektrisk løsning med hoved gassforsyning fra tank med nedkjølt flytende biogass samt redundant gassforsyning fra trykkflaske. Utfordringene med dette anlegget er som følger:

- Elektrisk fremdrift er unødvendig med ekstra vekt og volum men hurtigløpende gassmotorer beregnet for mekanisk fremdrift tilbys ikke per i dag for maritimt bruk.
- Gassmotorer som tilbys for maritimt bruk i aktuell effektstørrelse er medium speed type motorer som er altfor tunge og voluminøse til å anvendes i en hurtigbåt.
- Tank for flytende gass tilbys i syrefast stål utførelse som er en altfor tung løsning for hurtigbåter¹³
- Gasdrift i hurtigbåter har ikke vært gjort før i Norge og antas å være en relativt omfattende prosess å få godkjent da regelverket for gasdrift i skip i prinsipp er bygget opp rundt antagelsen at skipet er bygget i stål.

En mer egnet løsning for gasdrift i hurtigbåt ville være som illustrert i figur 4-16. Dette er en løsning med gassmekanisk drift med hurtigløpende gassmotor og lagring av gass på kompositt trykkflasker.



Figur 4-16: Gassmekanisk fremdrift prinsippkisse

¹³ Det kan tenkes at tank for flytende og nedkjølt gass alternativt kan tilbys i aluminium men dette har så vidt vi kjenner til ikke vært gjort før og av oss heller ikke blitt undersøkt med aktuelle leverandører.

Hoved utfordring med løsningen vist i figur 4-16 er at slik hurtigløpende gassmotor per i dag ikke tilbys til maritimt bruk¹⁴, begrenset rekkevidde og/eller store volumkrav for trykkflaskeløsning, samt regelverksgodkjenning.

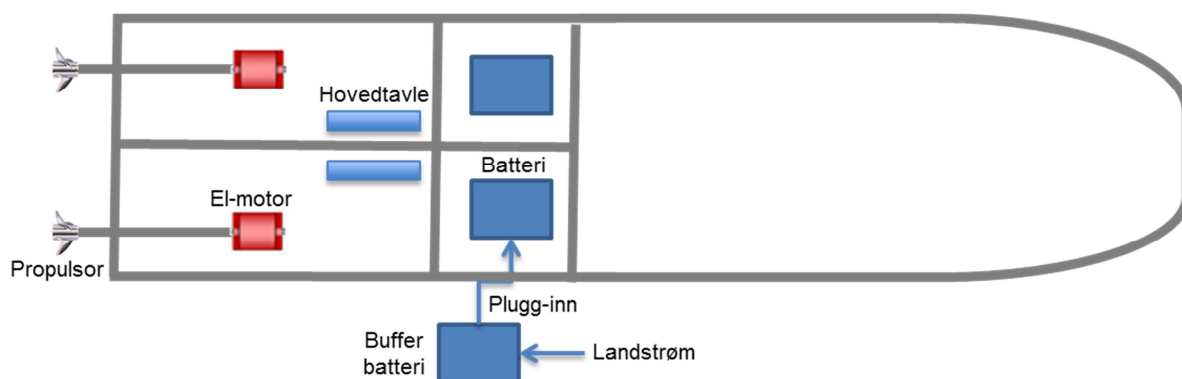
Løsning med gassdrift i hurtigbåt forventes med nye produkter på markedet å bli realiserbart, men er ikke inkludert videre i rapport, heller ikke i digitalt verktøy.

4.5.3 BATTERIDRIFT

Batteridrift krever et elektrisk fremdriftsanlegg bestående av følgende hovedkomponenter:

- Batterier med landstrøm ladeanlegg
- Omformere fra likestrøm til vekselstrøm
- Hovedtavle moduler for kraftfordeling til forbrukere
- Kraftkabler
- Fremdriftsmotorer med turtallsregulering
- Hjelpesystemer for kjøling, fjernstyring etc.

Løsningen er prinsipielt vist i figur 4-17 nedenfor (uten omformere og turtallsregulering vist).



Figur 4-17: Batterielektrisk fremdrift prinsippkisse

Dette elektriske fremdriftsanlegget erstatter hovedmotorer, generatorsett, hjelpesystemer (kjøling, brennstofftilførsel, eksos, fjernstyring etc.) og diesellager for den konvensjonelle dieselmekaniske løsningen. Utfordringen som en kommer tilbake til senere er at det ikke finnes samme grad av vektoptimaliserte løsninger for batterielektriske konsepter.

En ren batteribåt 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 enten dimensjoneres for syklus per overfart eller for syklus per dag (eller kombinasjoner av disse). 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.

Krav til landstrøm er betydelig for en batteribåt og langt utover normal landstrømkapasitet som er tilgjengelig per i dag på hurtigbåtterminalene. Kapasitet kan utbygges enten direkte fra nærliggende høyspenningsnett eller via bufferbatterier som står på land. For en bufferbatteriløsning vil en utnytte parallell opplading fra batteri og el-nett for å maksimere overføringskapasitet.

¹⁴ Motorleverandør MTU har hurtigløpende marine gassmotorer for mekanisk drift under utvikling/uttesting som forventes å være egnet til dette formålet.

Det er viktig å merke seg at en batteribåt ikke er egnet til alle ruter. I tillegg til vekt- og volumhensyn ligger det 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 batteribåt bør derfor være optimalisert for lavest mulig energiforbruk som typisk kan oppnås med kombinasjon av redusert fart, lav vekt og et minimum av energiforbruk til hjelpesystemer og hotell. Spesielt lav fart er virkningsfullt for å få ned energiforbruk.

Batteribåt anses egnet for ruter hvor overfartslengde er begrenset og hvor moderat fart kan aksepteres (dvs. 25 knop eller lavere).

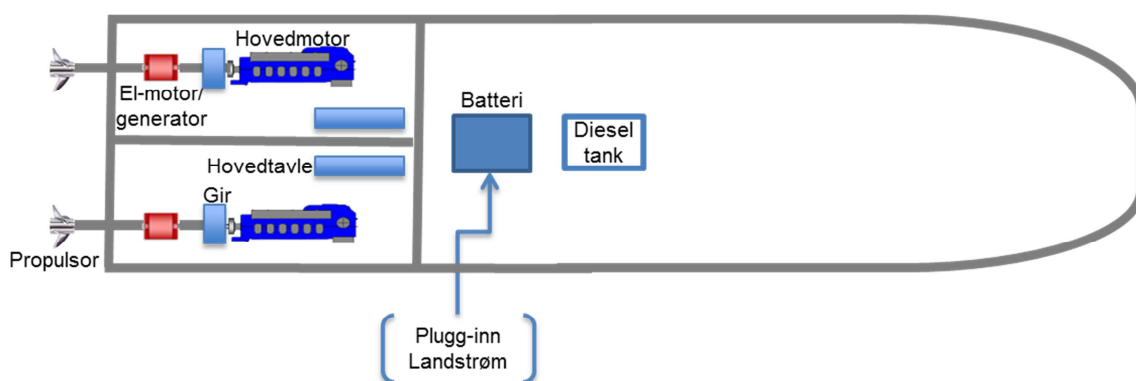
En ren batteribåt vil gi et CO₂ utslipp tilsvarende el-nettet på 75 gCO_{2EKV}/kWh, men en kan også se for seg en nullutslippsløsning dersom en kan utnytte et lokalt vann/vind minikraftverk eller tilsvarende.

Av vekt/volumhensyn samt behov for lang vannlinjelengde på skrogene ved relativt lav hastighet vil en batteribåt normalt bli noe større enn en tradisjonell dieselmekanisk løsning med samme passasjerkapasitet.

En batterielektrisk løsning vil representere en betydelig ekstra investering i forhold til tradisjonell dieselmekanisk løsning, men dette kommer en mer innpå i kapittel 5.

4.5.4 DIESEL/BATTERI HYBRIDDRIFT

Et diesel/batteri-hybridanlegg blir en kombinasjon av dieselmekanisk og batterielektrisk løsning. For en hurtigbåt er det mest relevant å konfigurere løsningen med en dieselmotor og en kombinert elektrisk motor/generator på samme fremdriftslinje som illustrert i figur 4-18 nedenfor. Alternativet ville vært egne dieselgeneratorer som er en tyngre og mer voluminøs løsning.



Figur 4-18: Diesel/batteri hybridfremdrift prinsippkisse

En kan tenke seg flere prinsipper for å bruke en slik løsning, som eksempelvis:

- Elektrisk «slowdrive» for operasjon i havnebasseng
- Deling av kraft til hovedpropulsjon og hjelpesystem i transitt
- Kraft til hjelpesystem og «Peak shaving» i transitt

Ulike kombinasjoner av disse kan også være relevant.

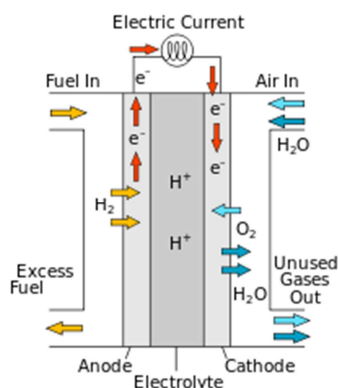
En diesel/batteri hybridløsning krever uansett to uavhengige systemer om bord, ett for dieselmekanisk drift og ett for batterielektrisk drift. Videre er utfordringen at det først og fremst er bruk i transitt som monner for å få klimagevinst og da er krav til kapasiteter store. Å ha relativt store kapasiteter i form av dieselmotor-, elektromotor- og batteristørrelse kombinert i et fartøy gir uakseptabelt høye vektorer for et energieffektivt båtkonsept og anbefales derfor ikke.

Løsning med diesel/batteri hybrid i hurtigbåt er ikke inkludert videre i rapport, heller ikke i digitalt verktøy.

4.5.5 HYDROGENDRIFT

Brenselceller, som batterier, fungerer ved at de konverterer lagret kjemisk energi til elektrisk energi som eksempelvis kan brukes til kraftforsyning for fremdrifts elektromotorer og hotellkraft om bord i et fartøy. Etersom konverteringen foregår elektrokjemisk uten bruk av forbrenning, opererer brenselceller generelt ved høyere termisk 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.

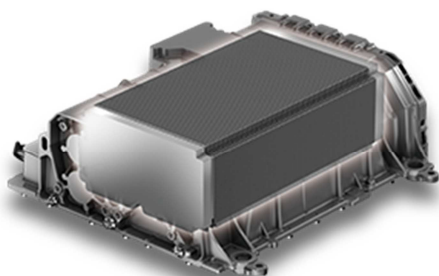
De fleste brenselcelleteknologier benytter hydrogen som drivstoff. Elektrisk kraft produseres ved at hydrogen og oksygen fra luft reagerer eksotermt til vann og energi ($H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O + e^- + \text{varme}$). Hydrogendrevne brenselceller representerer dermed en framdriftsteknologi uten direkte utslipp av klimagasser eller partikler (eneste utslipp er ren vanddamp). 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 maritim fremdrift.



Figur 4-19: Virkemåte PEM brenselcelle. Protoner ledes gjennom membran mens elektroner går i elektrisk krets. Hydrogen og oksygen fra luft reagerer på katoden og former vann.

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, i motsetning til batterisystemer hvor behov for dobbel mengde energi betyr dobbel mengde batterier. Ved større energibehov, eksempelvis for lengre overfarter eller høyere overfartshastighet, vil derfor brenselcellesystemer kunne gi vekt- og kostnadsbesparelser i forhold til ren batteridrift. Hydrogendrevne brenselceller representerer dermed en mulig nullutslippsløsning for strekninger hvor ren batteridrift ikke er praktisk gjennomførbart eller hensiktsmessig (grunnet høy vekt eller manglende ladeinfrastruktur/kapasitet).

Det finnes en rekke ulike brenselcelleteknologier, som hver har ulike fordeler og ulemper. Tabell 1¹⁵ i vedlegg C gir en oversikt over ulike teknologier med vurdering av anvendbarhet i passasjerbåter. 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. Innen PEM brenselceller skiller en også gjerne mellom kompakte enheter optimalisert for biler, og såkalte Heavy Duty moduler optimalisert for busser, tog, o.l., hvor høy virkningsgrad og levetid er viktigere enn fotavtrykk og rask respons.

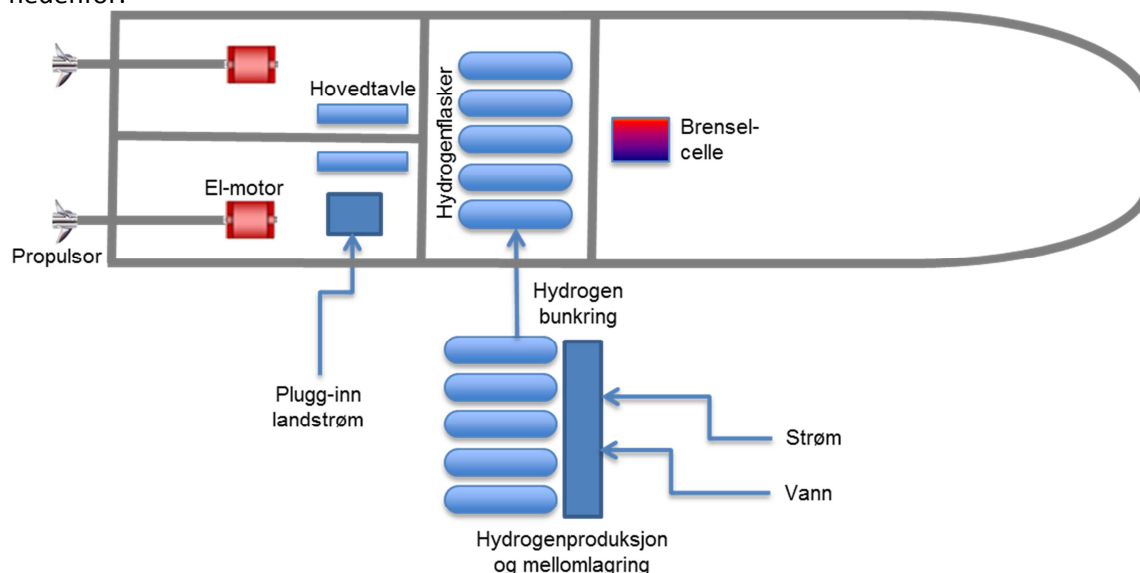


Figur 4-20a: Toyota PEM fuel cell stack



Figur 4-20b: Hydrogenics Heavy Duty PEM fuel cell modul

I denne studien har en basert seg på lagring av hydrogen om bord i fartøy med kompositt trykkflasker på 350 bar. Mengde hydrogen lagret om bord begrenses til det absolutt nødvendige og typisk har en kapasitet for en rundtur. Videre baserer en seg på lokal hydrogenproduksjon basert på elektrolyse av vann og hvor anlegget på land er dimensjonert for å produsere en dags kapasitet i løpet av ett døgn. En legger da opp til bufferlager av hydrogen på land og «tømming» over til lagertankene på båt ved hjelp av trykkutligning. Prinsipielt er løsningen vist i figur 4-21 nedenfor.



Figur 4-21: Hydrogen fremdrift prinsippskisse

Et hydrogenanlegg om bord i fartøy med elektrisk fremdrift, brenselcelle og trykktanker krever et større volum enn en tradisjonell dieselmekanisk løsning. På grunn av dette samt behov for større bæreevne til å håndtere økt vekt vil en hydrogenfartøy måtte bli betydelig større. Vi har i dette

¹⁵ Comparisons of Fuel Cell Technologies, <http://energy.gov/eere/fuelcells/comparison-fuel-cell-technologies>, 2014

studiet basert oss på at et hydrogendrevet fartøy vil ha størrelse som et tradisjonelt fartøy med 50 passasjerers høyere kapasitet (dvs. 200 PAX hydrogenfartøy vil ha samme størrelse som 250 PAX dieseldrevet fartøy)

4.6 GENERELLE ENERGIEFFEKTIVISERENDE OG KLIMAVENNLIGE TILTAK

Med generelle tiltak menes energieffektiviserende og/eller klimavennlige tiltak som per i dag ikke er «standardløsning» for hurtiggående passasjerbåter og som kan tenkes implementert på vilkårlig type båtkonsept. Slike mulige tiltak er presentert nedenfor med inndeling i følgende hovedkategorier:

Spart tidsbruk ved kai: Tiltak som gir indirekte energieffektivisering i form av redusert transitt hastighet som muliggjøres til uendret avgangsfrekvens. Spart på/avstigningstid brukes heller som økt tid tilgjengelig til neste transitt.

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 driften (manøvrering, akselerasjon, retardasjon eller ved kai).

Redusert energiforbruk til hjelpesystemer & hotell: Tiltak som gir energieffektivisering på forbrukere som går konstant uavhengig av om fartøy går i transitt eller ligger til kai.

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

Det mest fundamentale og indirekte energieffektiviserende tiltak for hurtigbåter er lavest mulig vekt. For å oppnå høy hastighet til moderat energiforbruk er det nødvendig med en lettbygget konstruksjon. I tillegg til bruk av lettvekts skrogmaterialer som aluminium og karbonsandwich er det også nødvendig at utrustning er så enkel som mulig og at utstyr som benyttes er av lettvekts utgave. I dette studiet er det tatt for gitt at vektoptimalisering ligger til grunn. Utfordringen en ser er at innføring av tekniske løsninger for nullutslippsalternativer gjerne medfører høye vekter. En skal også være oppmerksom på at mulighet for vektoptimalisering er direkte styrt av sluttendes anbudskrav til en gitt båt drift. Dersom det kreves ekstra funksjonalitet og komfort utover det normale vil dette ofte gi seg utslag i økt vekt og derav redusert energieffektivitet. Dette er videre utredet i kapittel 5.

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

4.6.1 TILTAK FOR SPART TIDSBRUK VED KAI

I dette studiet er det tatt utgangspunkt i en relativt optimal dieselmekanisk hurtiggående passasjerbåt hva gjelder energiforbruk, samt antatt normale forhold for påstigning og avstigning av passasjerer ut i fra fartøys størrelse og normal helning på landgang (ref. tiltakene beskrevet nedenfor). Dersom dette ikke er tilfellet må bruker selv ta høyde for restriksjon (angis som % reduksjon i studiens tilhørende digitale verktøy).

Samtidig må det bemerkes at alle former for operasjoner som medfører økt tidsforbruk ved kai utover det nødvendige (les: negative tiltak) må unngås, inkludert eksempelvis:

- Billettsjekk ved avstigning og billettering på landgang mens passasjerer går om bord.

- Venting på passasjerer eller korresponderende busser som kommer senere enn rutetabellens avgangstid.
- For tidlig ankomst på grunn av for høy transittthastighet.

Følgende tiltak for redusert tidsbruk ved kai er identifisert.

Passasjer venterom: Dersom det arrangeres venterom for passasjerer nær kaikant, med god sikt og med annonsering av ankommende fartøy vil medgått tid til å få passasjerene klar til å stige om bord kunne minimeres.

Passasjertunell: Dersom det fra venterom nevnt ovenfor og direkte inn i fartøys passasjersalong kunne arrangeres opplyste passasjertuneller for værbeskyttet på- og avstigning vil en også kunne unngå vær- og døgnavhengig tidsforbruk.

Flytende terminal: Dersom det arrangeres hurtigbåtterminal som flytebrygge vil en eliminere tilpasninger som ellers er nødvendig med landganger som kompenserer for tidevannsnivå.

Fast landgang: Med flytende terminal og kun en båttype i ruten kan en arrangere fast landgang som gjør at en unngår tidsforbruk til å legge ut manuell eller fjernstyrt landgang. Landgang kan i prinsipp være en fast rampe med flapp som legges over åpning mellom terminal og båt.

Antall/bredde på landganger: Det kan arrangeres egen landgang for påstigning og egen landgang for avstigning slik at dette kan utføres samtidig. Alternativt kan en lage en brei landgang som har to adskilte gangbaner for henholdsvis påstigning og avstigning.

Baug/sideanløp: Bauganløp er allerede vidt anvendt og gjør at en slipper å fortøye fartøyet slik som normalt gjøres med anløp mot skipsside.

Trafikkovervåking: Med aktiv trafikkovervåking vil en være i stand til å forutsi rimelig nøyaktig hvor mange passasjerer som skal med ved neste stopp, og på den måten kunne avpasse fart slik at det akkurat er nok tid tilgjengelig til på/avstigning før neste avgang.

4.6.2 TILTAK FOR REDUSERT FREMDRIFTSEFFEKT

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

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

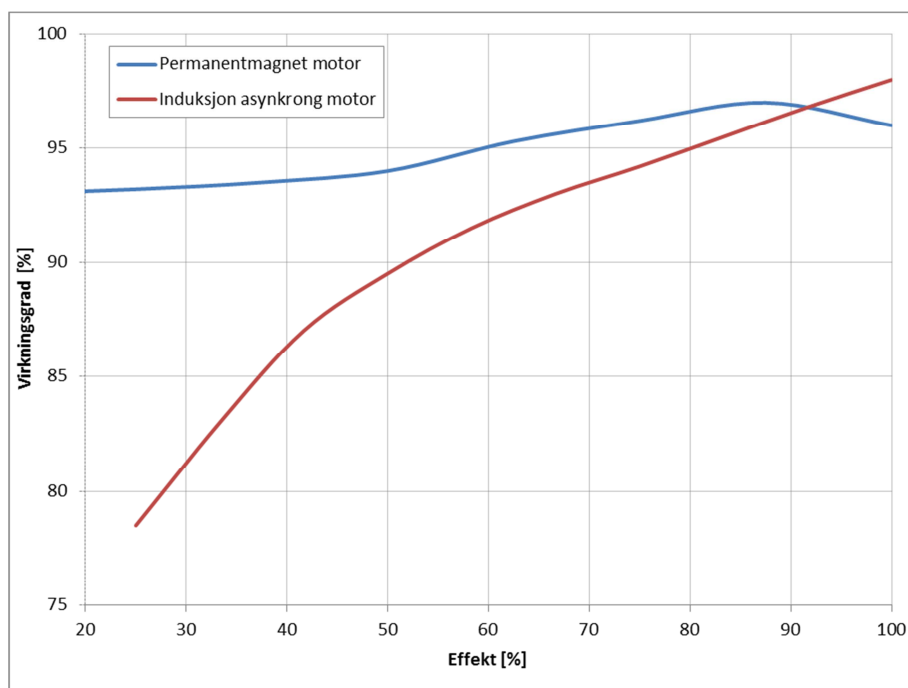
- Manglende vektoptimalisering av fartøy
- Ugunstig plassering av propulsor
- Ineffektive propulsorer for fremdrift
- Manglende hydrodynamisk optimalisering av skrogform
- Uttak av propell basert på mangelfullt grunnlag spesifikt for fartøyet
- Transmisjonsløsninger med store mekaniske tap eller viskøse 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 fartøy til kai medfører at en ikke trenger å benytte propulsor til å holde båten inn mot

kai eller stramming i trosse gjennom liggeperioden. Propulsjon kan dermed koples ut og motor tomgangkjøres mens fartøy ligger til kai og tilhørende energiforbruk spares. Effekt av dette tiltaket presenteres senere.

Permanentmagnet elektromotorer: Tradisjonelle asynkron elektromotorer 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 båt drift 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 4-22 som illustrer dette.¹⁶



Figur 4-22: Virkningsgrad for PM og konvensjonell induksjon asynkron motor etter propellkurve (Kilde: NES)

PM motorer har også relativ lav vekt sammenlignet med tradisjonelle asynkron motorer.

4.6.3 TILTAK FOR REDUSERT ENERGI FORBRUK TIL HJELPESYSTEM & HOTELL

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

For hurtigbåter utgjør energiforbruk til hotell- og hjelpesystemer en relativt liten andel.

Landstrømsoppkopling: Landstrøm koples normalt opp med manuell plugg og løs kabel til uttak på land som ikke nødvendigvis ligger helt inntil fartøy. Dette er medvirkende til at en kopler seg opp til landstrøm kun ved lengre kailigge. 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.

¹⁶ PM motorer er en dyrere teknologi enn tradisjonelle løsninger. Kan være spesielt egnet til rene batteribåter.

Energibesparende komponenter: Energibesparende komponenter og systemløsninger som kan anvendes i hurtiggående passasjerbåter innbefatter eksempelvis:

- Frekvensstyrte elektromotorer for 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).

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 betydelig overskudd av restvarme (eksempel ren batteribåt). En utfordring med slike tiltak er potensiell negativ effekt på grunn av økt vekt på fartøyet (og derav økt propulsjon effektbehov).

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.

En hurtigbåt har relativt få rom og enkle systemer. Det har heller ikke mannskapslugarer om bord og fartøys landstrømforbruk kjøres derfor ned til et minimum når det ligger til kai over natten.

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 landganger.
- Styremaskineri for ror eller vannjett styredeyse.
- Standby generatorsett.

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).

Batteripakke til hotell og hjelpesystemer: Batteripakke kan erstatte de dieseldrevne generatorsettene som produserer last til hotell- og hjelpesystemer. Batteripakken kan få hoved oppladning fra landstrøm og kompensert med kontinuerlig lading fra 24V dynamoer på hovedmotorene under transitt.

Lavenergi kiosk utstyr: En tradisjonell hurtigbåt er normalt utrustet med kiosk for passasjerer. Dette innbefatter noe kjøkkenutstyr og energi kan spares ved å introdusere nyeste teknologi av lavenergiløsninger som ellers er tilgjengelig for bruk i industrien og for husholdninger.



Kiosk: Dersom en fjerner kiosktilbud til passasjerer vil dette gi besparelser.

4.6.4 TILTAK FOR REDUSERT MILJØBELASTNING

I dette kapittelet presenteres tiltak som gir redusert 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 eksostemperatur 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 – ugunstig for dieselmekanisk).

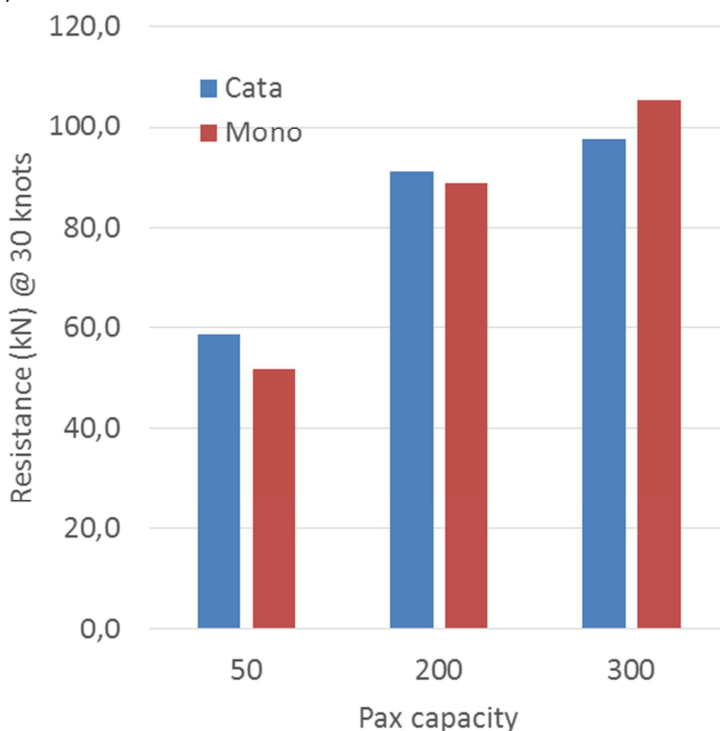
5. GENERELLE TRENDER OG RESULTAT

I dette kapittelet presenteres karakteristikker og egenskaper for hurtiggående passasjerfartøy som er direkte eller indirekte relatert til energieffektivitet, miljø- og klimautslipp. Presenterte resultater tar utgangspunkt i relevante eksempler for norske forhold hva gjelder fartøy og ruter.

Hoved hensikt er å introdusere leser til de påvirkende faktorer og hvordan energieffektiv og klimavenlig hurtiggående passasjerbåt drift kan oppnås. For konkrete utredninger av spesifikke ruter henvises leser til digitalt verktøy som leveres med denne rapport.

5.1 SKROGFORM

Selv om det finnes en rekke alternative skrogkonsept på markedet har vi begrenset oss til de to som er i bruk og anses mest hensiktsmessige for norsk hurtiggående passasjertrafikk, katamaran og enkeltskrogsfartøy (beskrevet mer i detalj i kapittel 4.3). Normalt er enkeltskrogsalternativet kun anvendt for mindre fartøy mens katamaraner er dominerende for resterende. Figur 5-1 nedenfor viser beregnet skrogmotstand for disse to alternativene som funksjon av fartøy størrelse.¹⁷



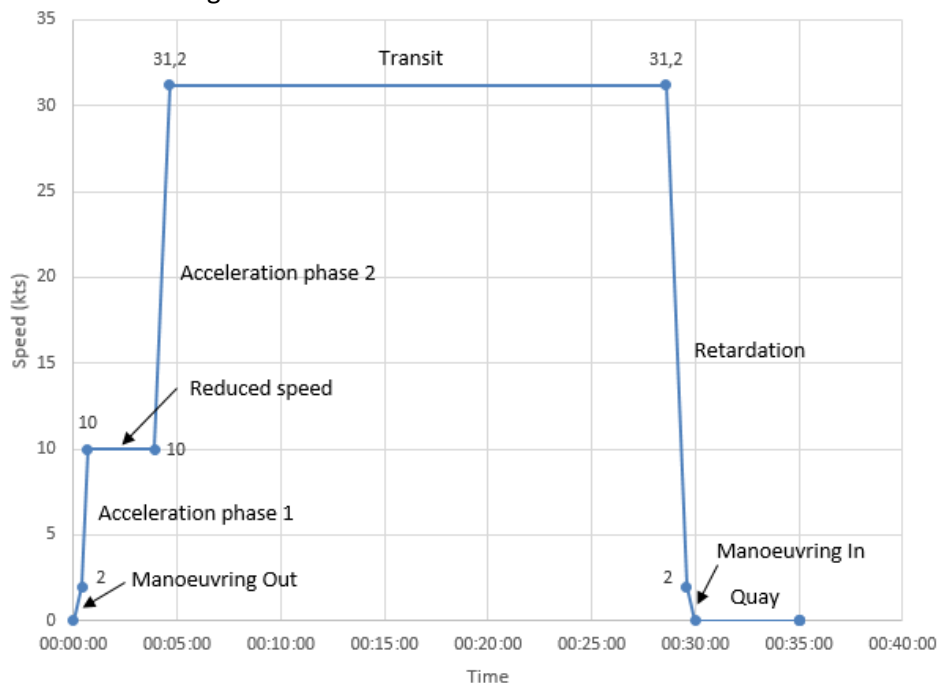
Figur 5-1: Skrogmotstand sammenlignet for enkeltskrog- og katamarankonsepter av ulik størrelse

En observerer av figur 5-1 at enkeltskrogsalternativet gjerne er en attraktiv løsning for mindre fartøystørrelser sett fra et energieffektiviseringssynspunkt, men oppsiktsvekkende er at enkeltskrogkonseptet kommer best ut helt opp til 200 PAX størrelse. Årsaken til at katamaranen likevel er dominerende i anvendelse for de fleste størrelser kan relatere seg til at dette er en stabil plattform som gjerne medfører mindre rullebevegelse og sjøslag i de relevante farvann (fjordsjø) og er mer egnet for hensiktsmessig arrangement av salong. Likevel, skal en være oppmerksom på at det i gitte tilfeller kan være aktuelt å vurdere enkeltskrogsalternativet til større fartøy enn gjøres i dag.

¹⁷ Eksempel i figur 5-1 viser fartøy bygget i karbonsandwich med transittthastighet på 30 knop

5.2 KARAKTERISTISK DRIFT OG DRIFTSPROFILER

For å være i stand til å vurdere ny miljø- og klimavennlig teknologi for passasjerhurtigbåter er det viktig at en forstår hvordan disse fartøy opereres og driftes per i dag. En typisk hastighetsprofil for slik drift er vist i figur 5-2.



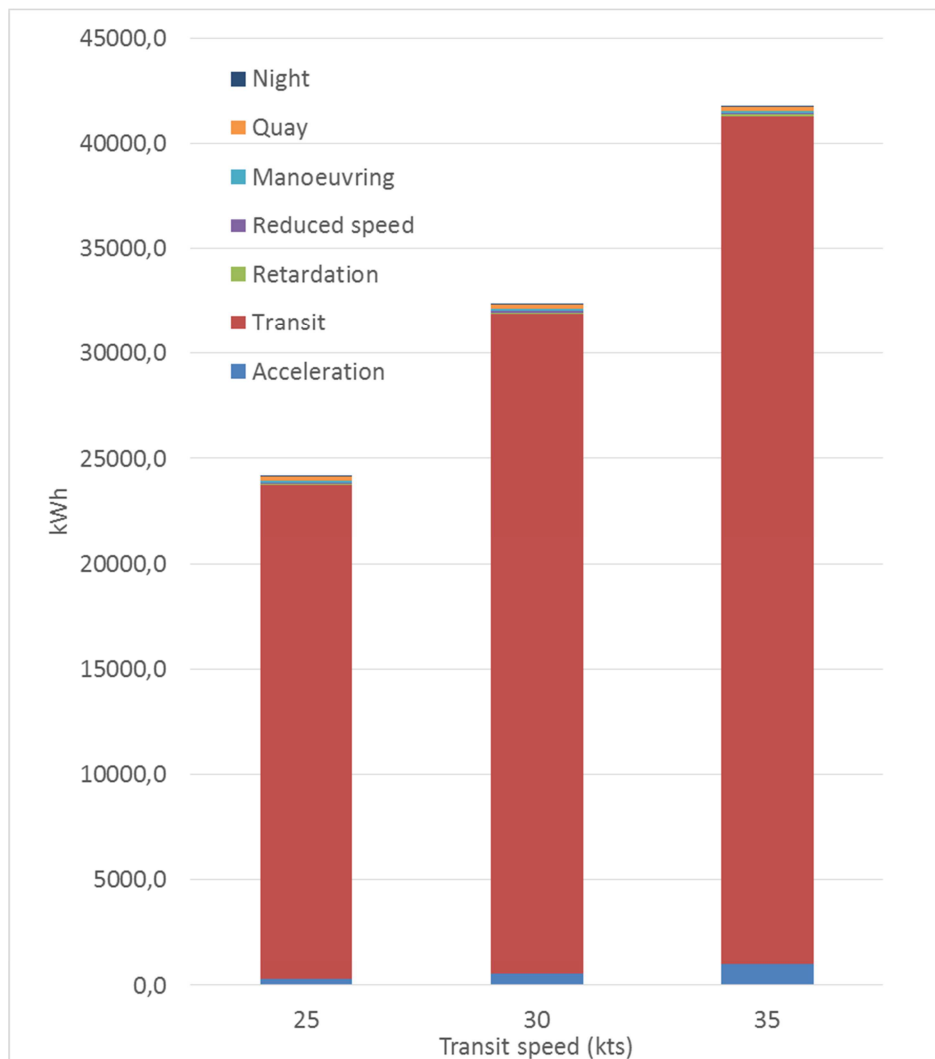
Figur 5-2: Hastighetsprofil 200 PAX katamaran for strekk på 30 minutter og 5 minutter til kai

Et hurtiggående passasjerfartøy opererer naturlig nok en stor andel av tiden ved høy hastighet. Dette krever mye energi og denne type fartøy har derfor et relativt stort hovedmaskineri for å besørge propulsjon. Samtidig er fartøyene enkelt utrustet og har dermed et relativt lavt energiforbruk til hotell- og hjelpesystemer. En typisk maskineriinstallasjon er som følger:

Hovedmaskineri for fremdrift	:	2 x 1000 kW
Hjelpemaskineri (hotell/hjelpesystemer)	:	2 x 35 kW

I hvilken grad energiforbruket til slike hurtiggående passasjerbåter er dominert av energiforbruk til propulsjon kan observeres av søylediagrammet i figur 5-3 hvor fordeling av det totale daglige energiforbruket for en typisk hurtiggående passasjerbåt er vist for en typisk rute¹⁸.

¹⁸ Fartøy benyttet er 35 m karbonkatamaran for 250 PAX i eksisterende rute mellom Tromsø og Harstad.



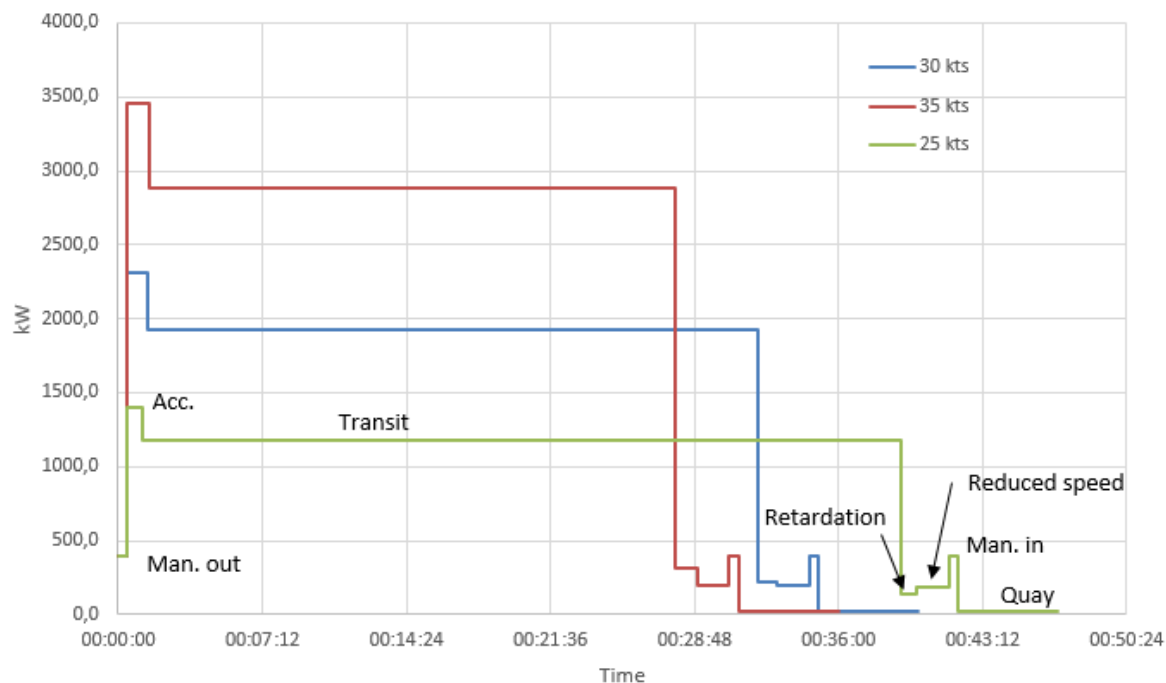
Figur 5-3: Fordeling av energiforbruk på ulike driftsmoder og forbrukere

En observerer av figur 5-3 at energiforbruk medgått til annet enn transitt (dvs. propulsjon) er nærmest neglisjerbart. Videre observerer en at energiforbruket varierer mye med valgt transittthastighet. Ut av dette kan en konkludere at mest hensiktsmessige tiltak for energieffektivisering og/eller utslippsreduksjon vil være med hovedfokus på følgende:

- 1) Energieffektive og klimavennlige propulsjonsløsninger
- 2) Energieffektivisering ved lavest mulig skrogmotstand
- 3) Generelle tiltak som kan medvirke til reduksjon av transittthastighet

5.3 VARIERENDE FART

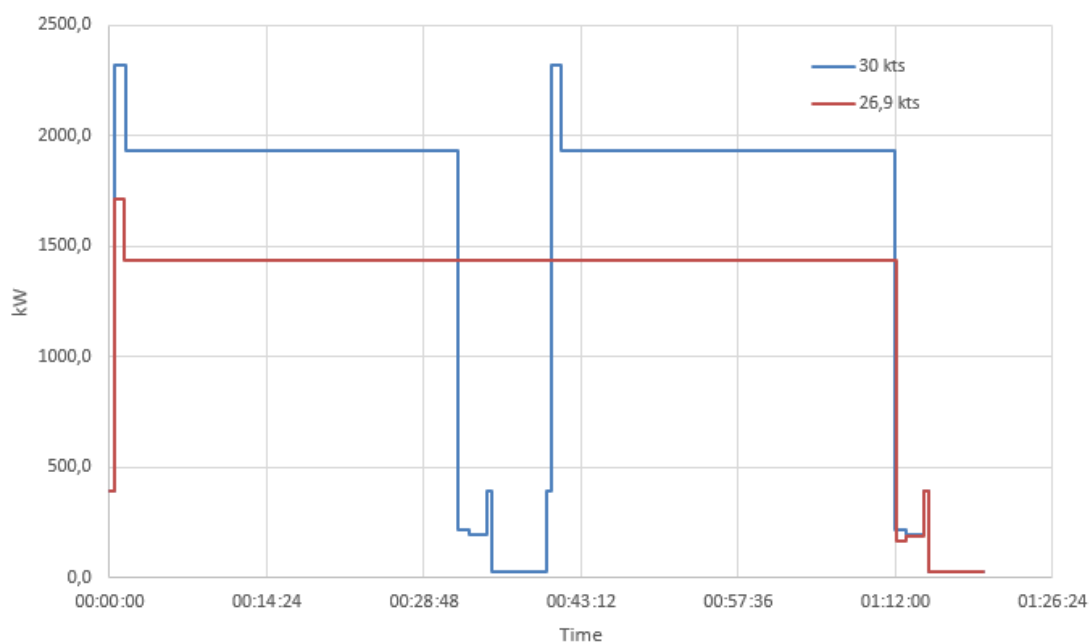
Samme eksempel som vist i figur 5-3 er fremstilt i figur 5-4 hvor effektforbruk som funksjon av tid er vist for ett av strekkene i ruten, dette med tre ulike hastigheter.



Figur 5-4: Effekt- og tidsforbruk ved ulike transithastigheter

I figur 5-4 observeres redusert effektbehov ved redusert fart, men en observerer også at betydelig tid går med til sakte fart, manøvrering og kailigge. I dette tilfellet sparer en 4 minutter på 35 knop sammenlignet med 30 knop. Dersom en kan spare 4 minutter knytt til sakte fart, manøvrering og kailigge ville en oppnådd samme rutetabell med 5 knops redusert fart og tilhørende reduksjon i forbrukt energi (18%). For å oppnå denne type tidsbesparelser relatert til stopp kan det vurderes spesielt optimaliserte terminalløsninger (mer om dette i kapittel 5.5).

I neste figur (figur 5-5) illustreres ett tilfelle med mellomstopp og ett tilfelle hvor en dropper mellomstopp og heller reduserer fart for samme ankomsttidspunkt til endestopp.



Figur 5-5: Spart effektforbruk når mellomstopp utelates

Eksempelet i figur 5-5 er relevant hvor en i forbindelse med ruteplanlegging skal velge mellom fast anløp til ett mellomstopp eller hvor passasjerer bestiller anløp kun ved behov (anropsanløp). I dette eksempelet er opprinnelig rutefart 30 knop, men dersom mellomstopp kan utelates kan også fart reduseres med i overkant av 3 knop som utgjør 13% redusert energiforbruk.

I eksemplene ovenfor har en sett på hvordan energiforbruk varierer med varierende fart og hvordan redusert fart kan oppnås for en gitt rute med en gitt båt. I neste eksempel presentert i tabell 5-1 viser en i tillegg hvordan energiforbruk utvikler seg om en også varierer båtens størrelse (basert på karbonkatamaraner med gjennomsnittlig 50% belegg).

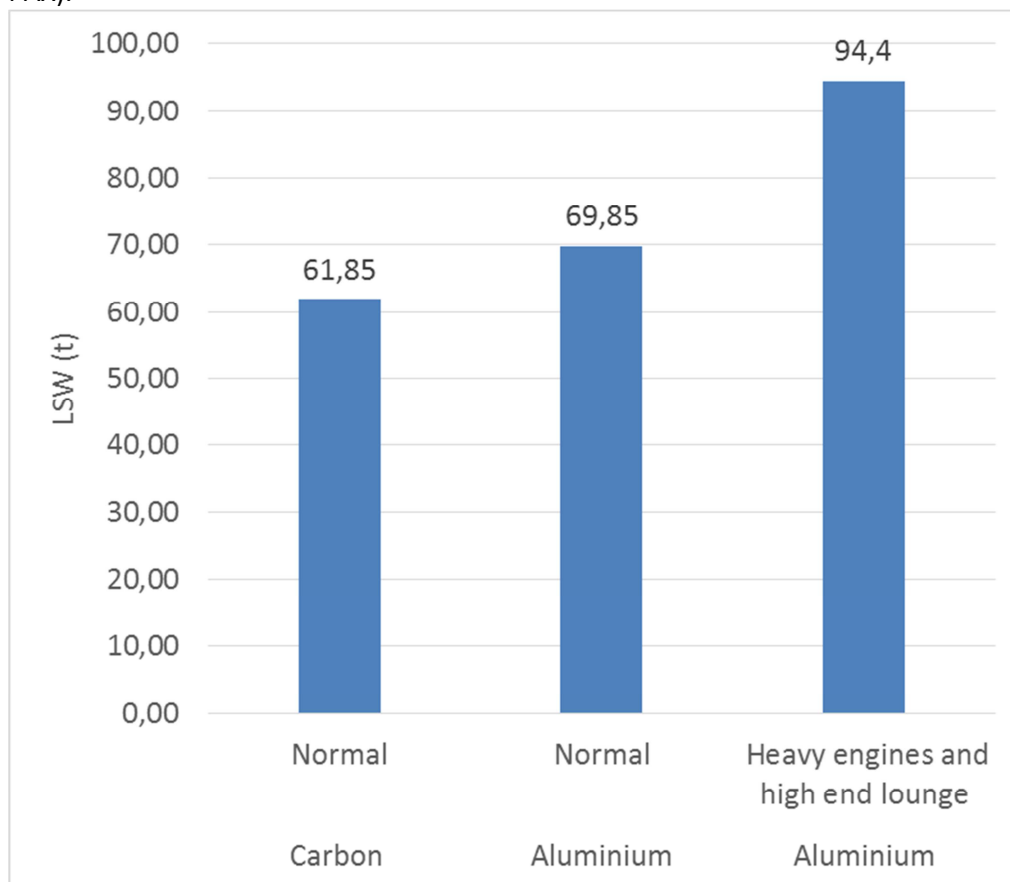
	25 knop	30 knop	35 knop
50 PAX	647	879	1271
100 PAX	409	548	769
150 PAX	312	414	571
200 PAX	265	357	494
250 PAX	217	277	364
300 PAX	197	260	353

Tabell 5-1: Energiforbruk per passasjerkilometer for varierende båtstørrelse og fart [Wh/pax km]

Da passasjerkapasitet per båt varierer har en i tabell 5-1 vist energiforbruk per passasjekilometer (Wh/pax km). Tabellen viser at den mest energieffektive løsningen er størst mulig båt med lavest mulig fart. En observerer også at et lite fartøy har større energiforbruk per passasjer ved 25 knop enn et større fartøy har ved 35 knop. Å velge en stor båt er selvfølgelig ikke riktig om det ikke finnes passasjergrunnlag for det, men dersom det lar seg gjøre å bruke en større båt med redusert fart og færre avganger til samme dagsproduksjon vil en kunne spare energi.

5.4 VEKTFØLSOMHET

Et spesielt forhold for hurtiggående passasjerfartøy er som tidligere nevnt følsomhet for vekt. For i det hele tatt å oppnå høy fart må lettvekts konstruksjonsmaterialer som aluminium og karbonsandwich benyttes. For å oppnå en mest mulig energieffektiv løsning er det viktig å redusere fartøyets vekt så langt det lar seg gjøre. Foruten skrog bør maskineri- og innredningsløsninger være enkle og lettbygde. Spesielt når det gjelder innredning har oppdragsgiver stor innflytelse hvor alle fasiliteter utover det absolutt nødvendige for passasjertransport medfører økt energiforbruk. Basert på en energieffektivitetsbetraktning vil derfor et fartøy med tilnærmet «buss standard» være å foretrekke. I figur 5-6 nedenfor er lettskipsvekt for ulike skrogmaterial og utrustningsstandard vist for samme størrelse fartøy (200 PAX).



Figur 5-6: Lettskipsvekt for ulike avarter av hurtigbåter

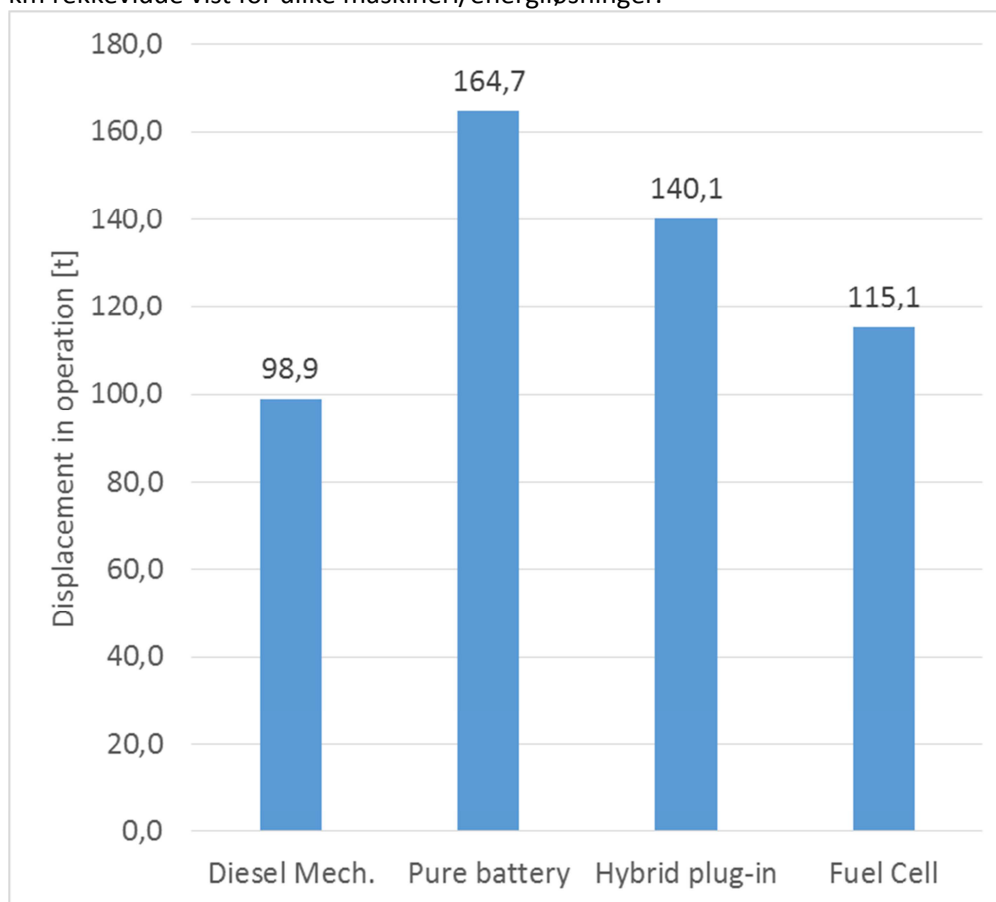
Av figur 5-6 observerer en rundt 13% høyere lettskipsvekt for en aluminiumsbåt sammenlignet med en i karbonsandwich. Videre kan en typisk observere en ytterligere 35% vektøkning mellom enkelt og bekvemlig innredning kombinert med tyngre maskineri, hvorav en for sistnevnte tenker seg høyere komfort i form av kiosk med full varmmat servering, lekeområder for barn, økt støyisolasjon (utover regelkrav), egen VIP salong, utsmykning, 4-motors anlegg etc. Tilhørende energiforbruk for de 3 alternativene i figur 5-6 er vist i tabell 5-2 nedenfor:

Katamaran 200 pax Rutefart 30 knop Rutelengde 30 km	Karbon, Normalt utrustet	Aluminium, Normalt utrustet	Aluminium, Tunge motorer & «high end» salong
Lettskipsvekt (tonn)	61,85	69,85	94,40
Lettskipsvekt (%)	100%	113%	153%
Energi/tur (kWh)	1172	1193	1388
Energi/tur (%)	100%	111%	129%

Tabell 5-2: Energiforbruk som funksjon av fartøys vekt

For hurtiggående passasjerbåter har en generelt benyttet maskineri og propulsjonsløsninger av spesielt lettbygde utgave. Slike produkter finnes på markedet da markedet samlet sett for hurtigbåter, yachter og marinefartøy er stort nok for industrien å tilby spesialprodukter. Derimot, for ny grønn teknologi som batteridrift og hydrogendrift som begge krever elektrisk fremdrift finnes ikke nødvendigvis tilsvarende lettbygde produkter. Dersom vektøkning for å få inn grønn teknologi med samme effekt og energilager er for stor vil det ikke la seg gjøre å realisere dette for hurtigbåter. Vektøkning vil da medføre økt effektbehov for å oppnå ønsket fart som igjen må kompenseres med enda tyngre løsning. Alternativt må en da finne kompromisser i form av redusert fart eller hyppigere bunkring for å realisere grønne løsninger (mer om dette senere).

I figur 5-7 er vekt (deplasement) av 250 PAX karbonkatamaran egnet for 30 knops rutefart og 70 km rekkevidde vist for ulike maskineri/energikonsepter.



Figur 5-7: Fartøysvekt med ulike maskineri/energikonsept, karbonkatamaran skrog

Antagelser som ligger til grunn er presentert i tabell 5-3.

	Ren batteridrift	Hybrid plugg-inn	H ₂ Brenselcelle
Batteri størrelse	4300 kWt	2200 kWt	400 kWt*
Landstrøm	5000 kW**	2600 kW**	-
Hydrogen lagervolum	-	-	4,3 m ^{3***}
Hydrogen bunkringsvolum	-	-	4,3 m ³

* Av redundanshensyn ** Basert på ½ time lading *** Bunkring for hver tur

Tabell 5-3: Antagelser for figur 5-7

Alternativet med dieselmekanisk propulsjon er å anse som referanseløsning. En observerer at en ren batterielektrisk løsning blir 66% tyngre og dermed ikke en egnet løsning for dette tilfellet (den økte vekten medfører krav til enda større maskineriinstallasjon for å opprettholde fartskrav). En plugg-inn hybridløsning kan i mange tilfeller være attraktiv da den reduserer kravet til batteristørrelse, men en observerer i figur 5-7 at den kombinerte tilleggsvekten av dieselgenerator, elektrisk propulsjon og batterier gjør løsninger mindre attraktiv for hurtigbåter. For batterielektrisk løsning utgjør i dette tilfellet elektrisk propulsjon 2% tilleggsvekt (dieselmekanisk maskineri fratrukket) og batterier 64%. Hovedpoenget med denne fremstillingen er å illustrere for leseren at en ikke kun kan «bytte maskineri» på en hurtigbåt men at en må vurdere hele driften totalt sett inkludert bunkringsintervall, rutehastighet etc.

Også for hydrogenalternativet er en avhengig av å gå veien via en elektrisk fremdriftsløsning. Tilleggsvekter for hydrogen blir dermed for elektrisk propulsjon, en mindre batteripakke (for utjevning av dynamisk last), brenselcelle og hydrogen trykkflasker. En observerer av figur 5-7 at hydrogen brenselcelleløsning har moderat vektøkning men her vil nok areal og volumkrav for hydrogenanlegget likevel kreve at fartøyet blir større enn tradisjonell løsning (typisk fartøystørrelse tilsvarende 250 PAX for å frakte 200 PAX).

5.5 ENERGIEFFEKTIVISERINGSTILTAK

Ulike energieffektiviserende tiltak er diskutert i påfølgende kapitler.

5.5.1 TERMINALTID

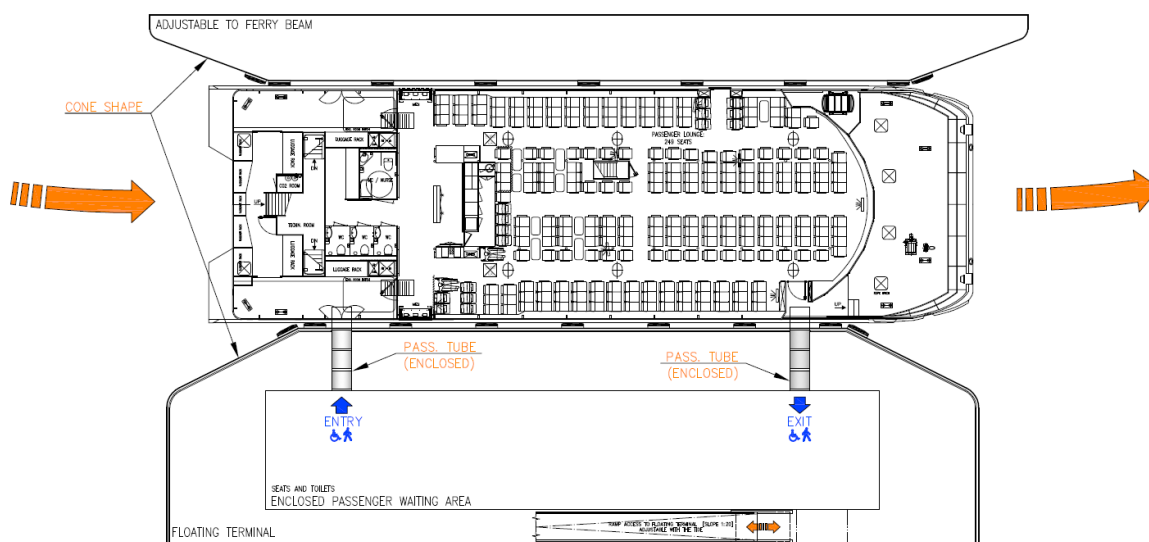
Terminaltid er en viktig parameter for hurtigbåtdrift og da spesielt i en rute med flere mellomstopp. For et mellomstopp er det direkte relasjon mellom tid brukt ved anløpet (terminaltid) og nødvendig fart en trenger for å holde ruten. Sparer en tid kan fart reduseres og tilhørende energiforbruk reduseres. Samme vil være tilfelle for en endestopp dersom fartøyet skal returnere umiddelbart, men ikke så relevant dersom det uansett er dødtid til neste avgang.

Terminaltid er påvirket av flere faktorer som:

- Eventuell sone med redusert fart inn til terminal
- Manøvrering og eventuell fortøyning til kai
- Utlegging av landgang
- Avstigning og ombordstigning av passasjerer
- Kaste loss og manøvrere ut fra kai

Situasjonen vil også avhenge av om fartøy og kaianlegg er forberedt for bauganløp eller sideanløp, om det er arrangert flytekai eller om tidevannsforskjeller må hensyntas.

En ideell hurtigbåtterminal ville gjerne sett ut noe slikt som vist i figur 5-8 nedenfor:



Figur 5-8: Tenkt optimal hurtigbåtterminal

En ser her for seg følgende prinsipper:

- Terminal bygges som flytekai hvor en ikke trenger ta hensyn til tidevannsforskjeller
- Venterom på terminal i kort avstand fra fartøy og med annonsering av ankomst
- Kileformet bås som tilpasses fartøy hvor det kjøres inn og låses i fast posisjon, og med mulighet for fartøy å fortsette videre i samme fartsretning etterpå.
- To stykk passasjertuneller direkte fra venterom til salong på fartøy, en for påstigende passasjerer og en for avstigende. Ingen behov for landgang da høyder og øvrig grensesnitt er tilpasset)

Med en slik løsning kan en oppnå den absolutt laveste terminaltid hvor manøvertid er minimert, ingen forøyning, ingen utlegging av landgang, samtidig avstigning/påstigning, ingen bruk av propulsjon ved kailigge og ingen behov for å bakke fartøy ut før en akselererer opp i fart igjen.

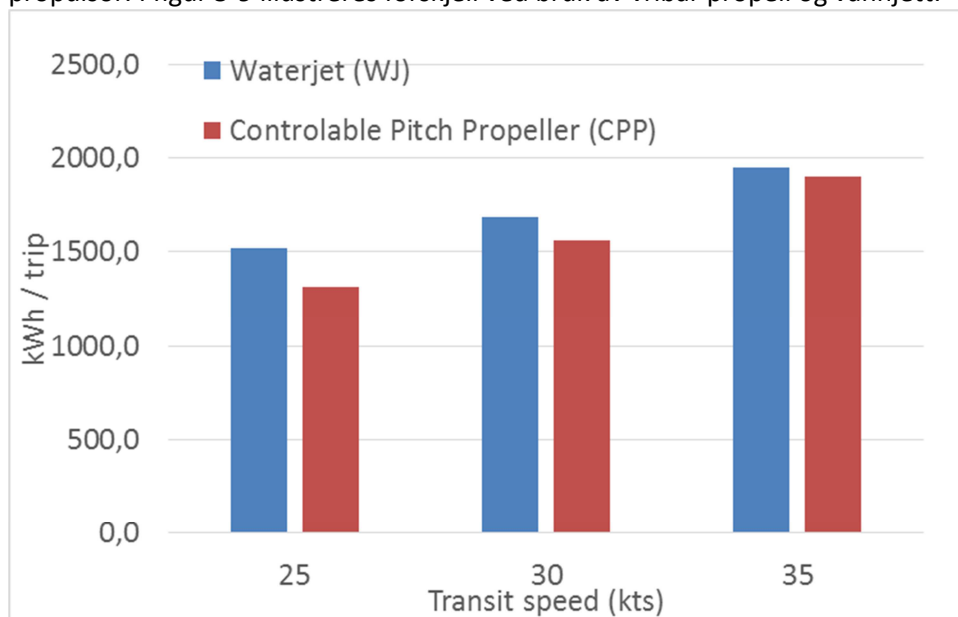
I tabell 5-4 er det vist med et eksempel hvilket nivå av tidsbesparelser en ser for seg med ulike effektiviseringsløsninger på kaianlegg. Prinsippet er at en bruker spart tid til å redusere transittthastighet og dermed oppnår betydelig energieffektivisering.

	Manuell gangvei	Hydraulisk gangvei	Hydraulisk dobbel gangvei	2 x hydrauliske gangveier	Ideell løsning ref. figur 5-8
Tid mellom avganger	00:16:00	00:16:00	00:16:00	00:16:00	00:16:00
Overfartstid	00:13:45	00:13:58	00:14:25	00:14:52	00:15:06
På/avstigning 2 x 50 PAX	00:02:15	00:02:02	00:01:35	00:01:08	00:00:54
Transittthastighet (knop)	32,6	32,0	30,7	29,6	28,7
Energi/tur (kWh)	532,7	509,9	467,4	430,8	400,3
Energibesparelse/tur (%)		4,3%	12,3%	19,1%	24,9%

Tabell 5-4 Effektiviseringspotensial med optimalisering av kailøsning

5.5.2 ALTERNATIVE PROPULSORER

Et eksempel på andre forhold som indirekte påvirker energiforbruk ved varierende fart er type propulsor. I figur 5-9 illustreres forskjell ved bruk av vribar propell og vannjett.



Figur 5-9: Energiforbruk for ulike propulsorer

En observerer i figur 5-9 at forskjell i energiforbruk er økende med minkende fart. Årsak til dette er at vribar propell oppnår høyere virkningsgrad ved lavere fart enn hva vannjet løsningen er i stand til. En tommelfingerregel er at disse to alternativene er nokså like ved 35 knop, at vannjet er bedre ved hastigheter over dette og vribar propell bedre nedover. Observasjonen er da at vribar propell som regel er å foretrekke for typiske norske passasjerruter.

5.5.3 TO SMÅ ELLER EN STOR

Det kan vurderes 2 mindre fartøy i samme rute eller ett større. I tabell 5-5 nedenfor har en sammenlignet 2 stykk 150 PAX fartøy med ett 300 PAX fartøy i samme rute.

	MJ	MJ/pax km	CO ₂ (t)
2 x 150 PAX	259 295	3,06	19 445
1 x 300 PAX	204 019	2,41	15 299
Differanse	127%	127%	127%

Tabell 5-5: Energiforbruk og CO₂ utslipp for 2 x 150 PAX versus 1 x 300 PAX fartøy

Eksempelet en har sett på er karbonkatamaraner med dieselmekanisk fremdrift og en rute på 12 km med 15 minutters overfart. Alternativet med 2 x 150 PAX fartøy har dobbel avgangsfrekvens mens totalproduksjon over døgnet er den samme.

Resultatet i tabell 5-5 er gjerne ikke oppsiktsvekkende, mindre fartøy er mer energikrevende enn ett større. Det som likevel kan gjøre alternativet med 2 mindre fartøy attraktivt fra et miljømessig synspunkt er mulighet for kapasitetsvariasjon i henhold til behov. Dersom en heller opererer kun ett av de små fartøyene kontinuerlig over dagen og supplerer med fartøy nummer 2 i rushtiden vil bildet som man ser av tabell 5-6 bli snudd på hodet.

	Belegg i rushtid	Belegg utenfor rushtid	MJ/dag i rushtid	MJ/dag utenom rushtid	MJ/dag totalt	MJ/pax km	CO ₂ /dag (tonn)
1 x 150 PAX	83%	69%	43 292	90 241	133 533	2,16	10 014
1 x 150 PAX	83%	-	43 292	-	43 474	1,93	3 243
1 x 300 PAX	83%	34%	68 275	135 650	203 925	2,79	15 292
Differanse			127%	67%	87%	76%	87%

Tabell 5-6: Energiforbruk og CO₂ utslipp for 1 x 150 PAX hele dagen + 1 x 150 PAX kun i rushtid versus 1 x 300 PAX fartøy

I dette tilfellet observerer en at økt utslipp på 27% fra tabell 5-3 nå er et redusert utslipp på 23% i favør av de mindre fartøyene. 2 mindre fartøy er selvsagt en dyrere løsning med gir også mulighet for økt avgangsfrekvens når det trengs.



5.5.4 HOTELL-LAST FRA BATTERIER

En har undersøkt en løsning hvor de 2 dieselgeneratorer til hotell- og hjelpesystem i en tradisjonell dieselmekanisk løsning erstattes av batterier. En tenker seg da at batteriene kan lades opp på landstrøm over natten og ved hver enkelt anløp. I tillegg ser en for seg kontinuerlig lading under transitt ved bruk av 24V DC dynamoer montert på hovedmotorene. Miljøgevinst blir i form av ren energi fra landstrøm kombinert med mer energieffektiv dieselprodusert energi fra hovedmotorer.¹⁹ Resultatet av undersøkelsen ser en av tabell 5-7.

200 pax cata carbon diesel mech / 12km /
 16min crossing / 47 trips per day / 30 kts /
 50% pax load
 5 min at quay / 250m at 10 kts in harbours

Genset is turned on only during transit (except in normal operation)
 Harbour area includes acc/ret/man/quay/reduced speed phases

	Fuel consumption (kg/day)	Fuel consumption - savings	CO2 emissions (kg/day)	CO2 emissions - savings	CO2 emissions in harbour area (kg/day)	CO2 emissions in harbour area - savings	Energy from shore (kWh)	Battery capacity (kWh)	Charging min power required (kW) *
Ferry normal operation	4 308	-	13 816	-	2349	-	-	-	-
Ferry with hotel load from batteries in harbour - charging from dynamo on main engine	4306	0,05%	13 809	0,05%	2224	5,31%	0	23,0	18,9
Ferry with hotel load from batteries in harbour - charging from shore during night	4 269	0,90%	13 704	0,81%	2224	5,31%	1 x 173	246,2	22,8
Ferry with hotel load from batteries in harbour - charging from shore at each stop	4 269	0,90%	13 704	0,81%	2224	5,31%	47 x 3,7	44,0	44,0

* When charging the night, charging time is about 7,6 hours.

When charging at each stop, charging time is 5 minutes

When charging with dynamo, charging time = transit time (11min40s)

** Battery can be dimensioned based on charging power with (C1) or on depth of discharge (20%)

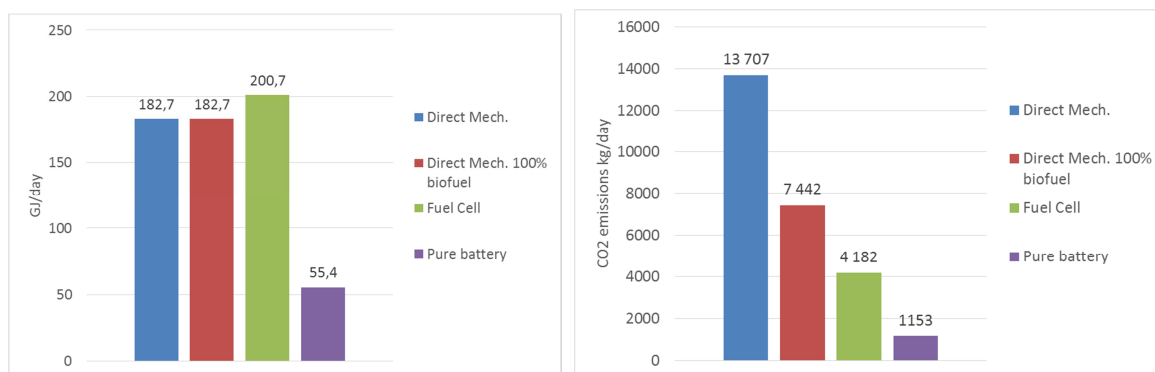
Tabell 5-7: Miljøeffekt av batterier til hotell og hjelpesystemer

En observerer at konseptet fungerer men i og med at hotell og hjelpesystemer utgjør så liten andel av det totale energiforbruket til en hurtigbåt er nytten begrenset.

¹⁹ Hovedmotorer har høyere termisk virkningsgrad enn små dieselgeneratorer

5.6 KORT PENDELSAMBAND

Vi har i dette studiet skilt mellom korte og lange ruter da type teknologi som er anvendbar vil variere med krav til rekkevidde. For relativt kort pendelrute (dvs. frem og tilbake mellom to stopp) ser en muligheten for å introdusere nullutslippsløsning basert på ren batteridrift, mens en ikke ser denne muligheten for de lengre samband (ref. diskusjon i tidligere kapitler). I figur 5-10 nedenfor presenteres energiforbruk og CO₂ utslipp for ulike alternativer basert på et 200 PAX fartøy i en rute på 12 km mellom to endestopp.



Figur 5-10: Energiforbruk og CO₂ utslipp for ulike alternativ i kort pendelrute

Antagelser som ligger til grunn er presentert i tabell 5-8.

	Ren batteridrift	H ₂ Brenselcelle
Batteri størrelse	720 kWt	400 kWt*
Landstrøm	2000 kW**	-
Hydrogen lagervolum	-	0,75 m ³ ***
Hydrogen bunkringsvolum	-	0,75 m ³
Hydrogen produksjon		35 m ³ /dag

* Av redundanshensyn *** Bunkring for hver tur

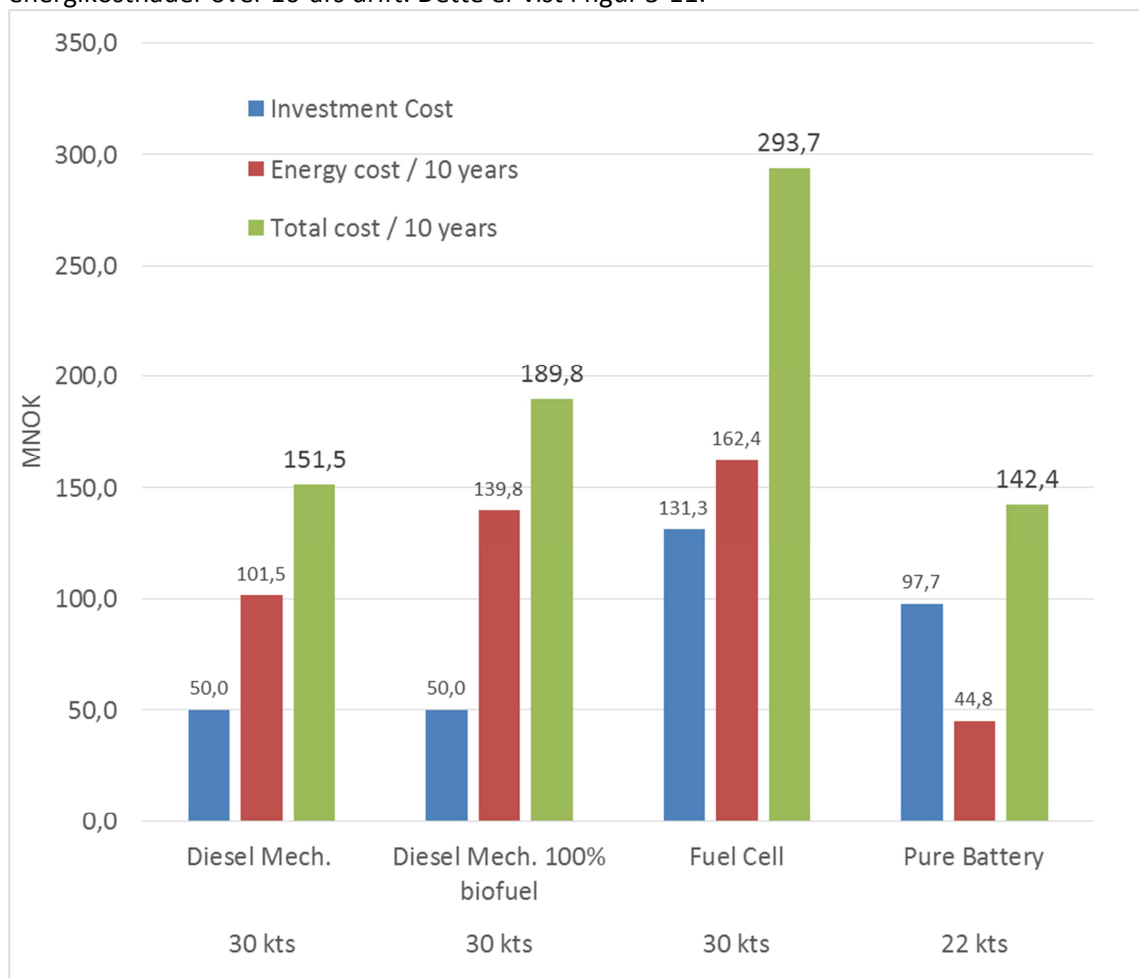
Tabell 5-8: Antagelser for figur 5-10

Vi lar dieselmekanisk løsning med 30 knops fart og 15 minutter overfart være referanse. Bruk av biodiesel medfører få endringer i forhold til tradisjonell drift. Samme maskineriløsning kan benyttes og ruteoppsett kan være uforandret. Med bruk av biodiesel oppnås 46% CO₂ reduksjon mens energiforbruk er uforandret.

For hydrogenalternativet har en basert seg på et større fartøy enn referansen for å ta høyde for areal og volumkrav til mindre kompakt maskineri/energiløsning (elektrisk fremdrift, brenselcelle og hydrogen trykkflasker), men en opprettholder samme rutehastighet. Benyttes hydrogen oppnås da 69% CO₂ reduksjon men 10% økt energiforbruk. Årsaken til det økte energiforbruket er at en for hydrogen som energibærer først krever elektrisk energi for produksjon av H₂ og deretter produserer elektrisitet igjen gjennom en brenselcelle.

For batterialternativet baserer en seg også på et større fartøy enn referansen samtidig som en også ser seg nødt til å redusere transitthastighet til 22 knop. Årsak til økt fartøystørrelse er i dette tilfellet ikke kun volumkrevende komponenter men vel så mye for å oppnå lav motstand ved relativt lav hastighet (dvs. bruk av lange slanke skrog). Da transitthastighet her er redusert blir overfartstid økt fra 15 til 20 minutter og en har da antatt operasjon over lengre tid eller 5 minutter kortere landligge mellom hver avgang. Benyttes batteridrift (dog med redusert hastighet) oppnås da 92% CO₂ reduksjon og 70% redusert energiforbruk.

En har også sett på kostnadsnivå for de ulike alternativer presentert i figur 5-10 gitt som investeringskostnad (båt + evt. landstrøm/hydrogenproduksjon anlegg på kai) pluss energikostnader over 10-års drift. Dette er vist i figur 5-11.



Figur 5-11: Kostnadsnivå for ulike alternativer, kort «pendelrute»

Antagelser som ligger til grunn er presentert i tabell 5-9.

	H ₂ Brenselcelle
Batteri størrelse	400 kWt*
Hydrogen lagervolum	0,75 m ^{3***}
Hydrogen bunkringsvolum	0,75 m ³
Hydrogen produksjon	35 m ³ /dag

* Av redundanshensyn *** Bunkring for hver tur

Tabell 5-9: Antagelser for figur 5-11

Ikke uventet er investeringskostnadene for både hydrogen- og batteridrift svært høye sammenlignet med tradisjonell dieselmekanisk løsning. Men for hurtigbåt drift er energikostnader en stor andel av totalen og det som da er positivt oppsiktsvekkende er at batterialternativet med sitt reduserte energiforbruk og med lavere energipris kommer ut som det totalt sett rimeligste alternativet.²⁰ En observerer også at hydrogenalternativet lider under en relativt stor

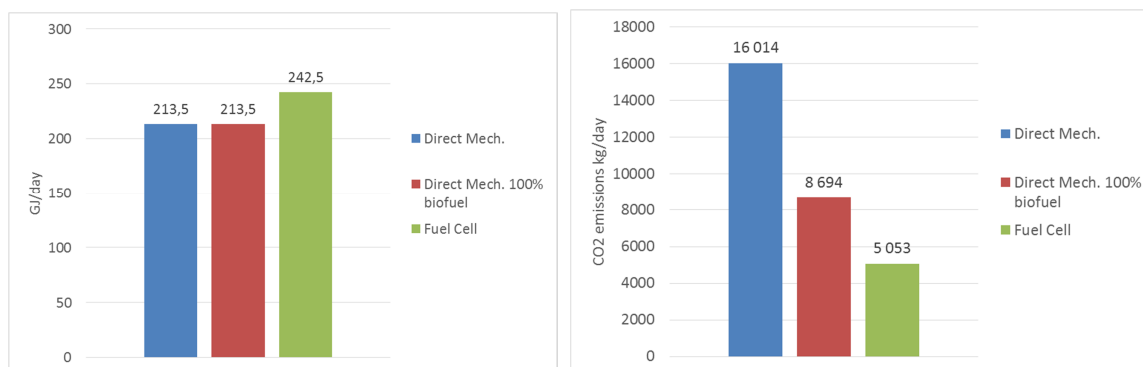
²⁰ Antatte kostnader for investering og energi er beskrevet i kapittel 6.12 og 6.13

investeringskostnad på lokal hydrogenproduksjon som utgjør 23% av totalinvestering. Dersom H₂ kan hentes fra alternative kilder som flere forbrukere deler på vil bilde bedre seg noe.

Konklusjon angående hvilket konsept en skulle gå for avhenger av ambisjonsnivå for utslippsreduksjon, i hvilken grad det er mulig å justere rutetabell, teknisk modenhet på konseptene og selvsagt pris.

5.7 LANG RUTE

For lengre ruter blir rekkevidden en utfordring for nullutslippsløsninger, spesielt er dette tilfellet for batteriløsninger. Alternativet med plugg-inn hybrid som kombinerer dieselmotoren og batterier er heller ikke velegnet for hurtigbåter da også det medfører store tilleggsvæker. Hydrogen kan vise seg å være det beste alternativet om klimakravene er strengere enn det en kan oppnå med bruk av biodiesel. Figur 5-12 nedenfor illustrerer energiforbruk og CO₂ utslipp for disse alternativene i en typisk lang hurtigbåt rute.



Figur 5-12: Energiforbruk og CO₂ utslipp for ulike alternativ i lang rute

Antagelser som ligger til grunn er presentert i tabell 5-10.

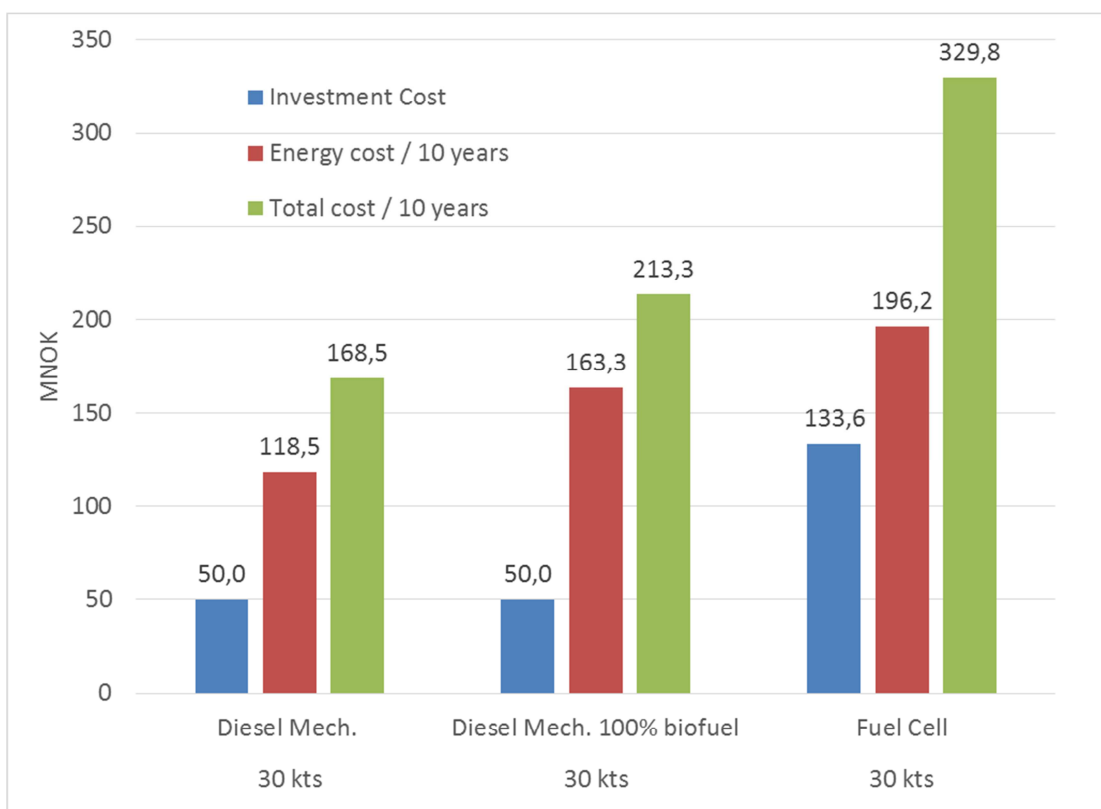
	H ₂ Brenselcelle
Batteri størrelse	400 kWt*
Hydrogen lagervolum	5,3 m ³ ***
Hydrogen bunkringsvolum	5,3 m ³
Hydrogen produksjon	45 m ³ /dag

* Av redundanshensyn *** Bunkring for hver tur

Tabell 5-10: Antagelser for figur 5-12

I dette tilfellet ser en på 200 PAX karbonkatamaran med 30 knops fart på en 85 km lang rute. En observerer også her at hydrogenalternativet til tross for dårlig energieffektivitet kommer ut som beste alternativ hva gjelder CO₂ utslipp. Det er her snakk om et ekvivalent CO₂ utslipp og hydrogen er da svært følsom for kilden som el-produksjonen baseres på, hvor løsningen kan representere alt fra en nullutslippsløsning til en «miljøbombe» basert på elektrisitet fra kullkraftverk. Det aller viktigste med en hydrogenløsning er at den som eneste alternativ legger til rette for en mulig nullutslippsløsning.

I figur 5-13 er kostnadsnivå for investering pluss 10 års energiforbruk vist for samme alternativ som presentert i figur 5-12.



Figur 5-13: Kostnadsnivå for ulike alternativer, lang rute

Antagelser som ligger til grunn er presentert i tabell 5-11.

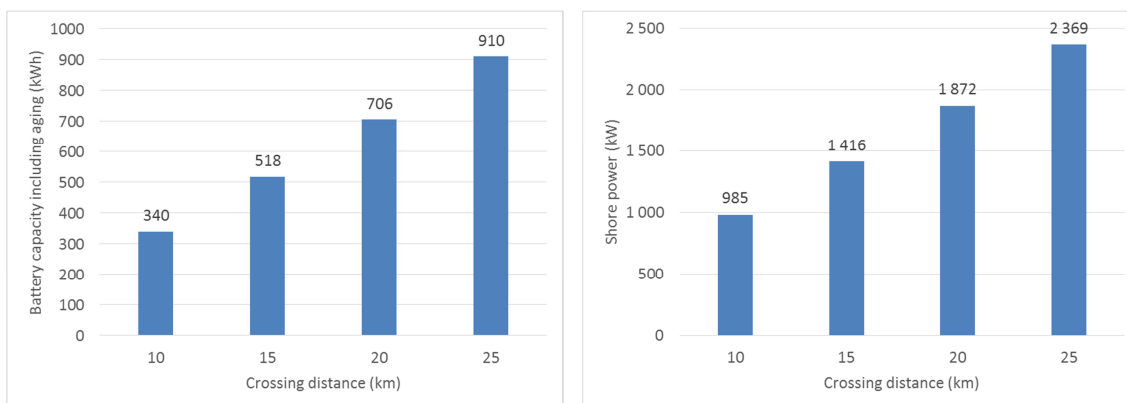
	H ₂ Brenselcelle
Batteri størrelse	400 kWt*
Hydrogen lagervolum	5,3 m ³ ***
Hydrogen bunkringsvolum	5,3 m ³
Hydrogen produksjon	45 m ³ /dag

* Av redundanshensyn *** Bunkring for hver tur

Tabell 5-11: Antagelser for figur 5-13

En observerer her en tilsvarende trend som for den korte pendelruten vist i forrige kapittel. Men i dette tilfellet har en utelatt batterialternativet da krav til rekkevidde er for utfordrende å tilfredsstille. Igjen er hydrogenalternativet det mest kostbare og i tillegg det alternativet som innehar størst usikkerhet (ref. anbefaling om først å kjøre et demoprojekt på denne teknologien).

For å illustrere utfordringene med et rent batterikonsept kan en studere figur 5-14 nedenfor.



Figur 5-14: Batteristørrelse og landstrømkapasitet som funksjon av rekkevidde

I dette tilfellet ser en på en 200 PAX karbonkatamaran med moderat hastighet på 20 knop og relativt begrenset rekkevidde fra 10 til 25 km per strekk. Likevel observerer en at krav til batteristørrelse og landstrømkapasitet blir stor. Dersom en vurderer en rute kun mellom 2 endestopp vil ikke nødvendigvis tidsbegrensning være et problem for lading (i og med at en ofte ikke returnerer med en gang igjen), men med mellomstopp er antatte 10 minutter ladetid og tilhørende kapasiteter relevant.

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 teoretisk database av båtkonsepter som danner basis for studien og tilhørende digitalt verktøy. Databasen omfatter 24 forskjellige kombinasjoner av skrog, arrangement, størrelser og skrogmaterial, hvor følgende er variert:

- Hurtigbåter i kapasitet fra 50 til 300 PAX
- Enkeltskrog og katamaran skrogkonsepter
- Aluminium og karbonsandwich byggemateriale

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

- Dieselmekanisk fremdrift (også med biodiesel drift)
- Hydrogen brenselcelledrift
- Ren batterielektrisk drift

Totalt sett utgjør databasen dermed 72 ulike konsepter.

Databasen benytter relevante katamaran nybyggingsreferanser som LMG Marin har tilgjengelig. Videre blir det fylt ut med teoretisk beregning, skaleringer og CFD analyser mellom referansene og for å oppnå den komplette databasen.

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 PAX kapasitet.
- Beregne skrogvekt basert på tilgjengelig referanse eller basert på 3D panelmodell av fartøys hovedstruktur bygget opp i Rhino programvare.²¹
- Beregne totalt lettskip som beskrevet i 6.5.1 og dødvekt som beskrevet i 6.5.2.
- 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.

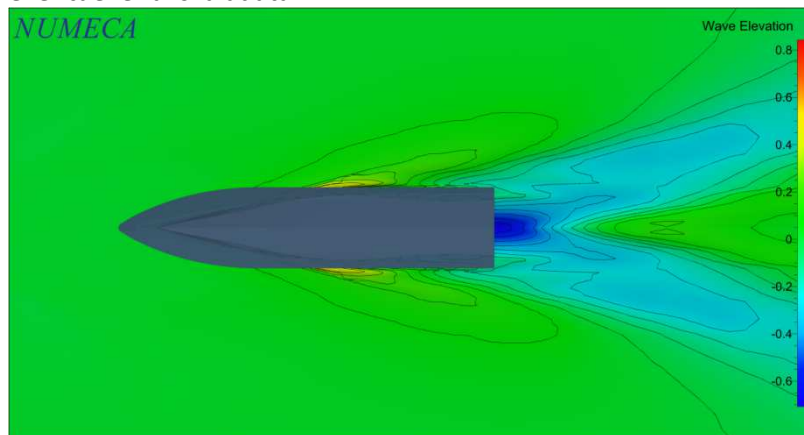
Det legges også til en %-verdi som margin på motstand for å ta hensyn til vær og groe. Denne kan endres i det digitale verktøyet men er i utgangspunktet satt til 5%. Det kan være naturlig å variere sjømargin avhengig av hvor værhard en gitt rute er. Verdi som angitt ovenfor anses representativt for typisk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

Det antas en skrogruhet på 70 µm som er gjeldende for skrog bygget i aluminium og karbonsandwich.

²¹ Hvor 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

Enkeltskrog

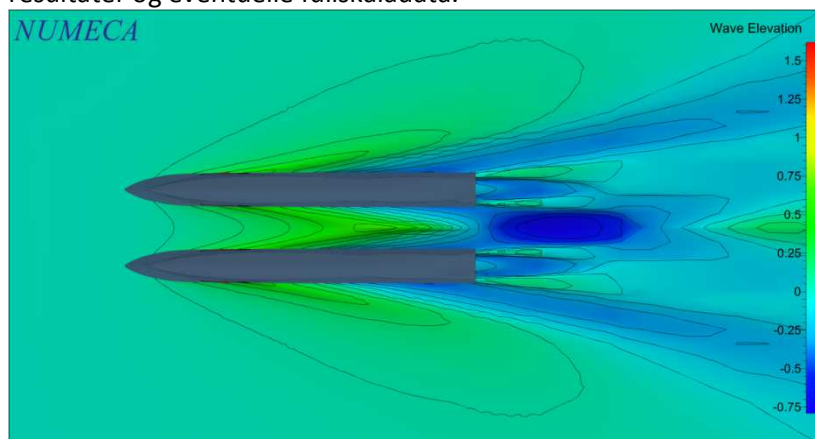
Skrogmotstand for enkeltskrog direkte-beregnes etter CFD metode. Input data til beregningen er utarbeidde skroglinjer. I tillegg benyttes skalering av tilgjengelige modelltest resultater og eventuelle fullskaladata.



Figur 6-1: Eksempelutskrift CFD analyse av enkeltskrog

Katamaran

Skrogmotstand for katamaranskrog direkte-beregnes etter CFD metode. Input data til beregningen er utarbeidde skroglinjer. I tillegg benyttes skalering av tilgjengelige modelltest resultater og eventuelle fullskaladata.



Figur 6-2: Eksempelutskrift CFD analyse av katamaranskrog

6.2.2 FREMDRIFT

Fremdrift baserer seg på at det benyttes en av følgende type propulsjonsløsning:

- Vribar propell
- Vannjet
- Rorpropell med kontraroterende propeller (for mindre båter)

For samtlige alternativer legger en opp til turtallsvariasjon og selv med vribar propell legger en i denne studien opp til at belastning varierer etter propellkurve²².

²² 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.

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 (ikke-konservativ antagelse).

Mekaniske tap

Mekanisk tap finnes i gir og opplagring av akselsystem og for de aktuelle konseptene som er studert antas følgende:

Gir og akselsystem for vribar propell	:	3%
Gir og akselsystem for vannjett	:	3%
Rorpropell med kontrarotasjon	:	5 - 7%

Konstant prosentvis tap er en ikke-konservativ betraktning da mekanisk tap normalt vil øke i %-verdi ved redusert turtall (varierer eksempelvis fra 5% ved fullt turtall til 10% ved tomgangsturtall).

Elektriske tap

Elektriske tap antas også til å være konstant med gjennomsnittsverdi for typisk driftsprofil:

Ren batteri eller hybrid plugg-inn med kraft fra batteri:	8,7%
Elektrisk drift fra hydrogen brenselcelle:	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 tavle til levert mekanisk energi fra frekvensstyrt motor:	5,9%
Fra tavle til hotell og hjelpesystemer:	3,0%

Av vekthensyn er det kun vurdert høyturtall permanentmagnetmotorer (med reduksjonsgir) som elektriske fremdriftsmotorer i dette studiet.

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:

Marinediesel	:	40,8 MJ/kg
Biodiesel	:	44,1 MJ/kg
Hydrogen	:	118,9 MJ/kg

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 fartøy som er antatt til 4%.

For hydrogen måles energiforbruk som det elektriske forbruket som er nødvendig for å produsere hydrogenet ved hjelp av elektrolyse.

6.3 DRIFTSPROFIL

Driftsprofil som antatt for en rute eller legg av rute 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
- Til kai

Tid for manøvrering fra og til kai varierer som funksjon av båtstørrelse, med minimum totaltid (manøvrering fra kai + manøvrering til kai) på 35 sekunder for 50 PAX fartøy og opp til 60 sekunder for 300 PAX fartøy. Det antas i disse manøvrermødene en konstant effekt fra 200 kW for 50 PAX til 400 kW for 300 PAX fartøy. Tilbakelagt distanse fra og til kai i disse modene antas ubetydelig (neglisjert).

Akselerasjonstid og tilbakelagt distanse baseres på referanser, analyse og/eller beregninger utført av propulsjonsleverandør samt tilgjengelig propulsjonseffekt på 120% av effektbehov under transitt. Det antas en starthastighet på 1 knop. Akselerasjon på $0,225 \text{ m/s}^2$ antas for en aluminiumsbåt. For fartøy i karbonsandwich oppnås økt akselerasjon på $0,250 \text{ m/s}^2$ 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 10% av effektbehov under transitt.

Fartøys transitthastighet	Tilbakelagt distanse i akselerasjon	
	Alu ($0,225 \text{ m/s}^2$)	Karb ($0,250 \text{ m/s}^2$)
20 knop	234 meter	211 meter
25 knop	366 meter	330 meter
30 knop	528 meter	475 meter
35 knop	719 meter	647 meter

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

En distanse med en viss redusert fart kan også spesifiseres. Denne distansen kan være en sum av flere kortere overgangsperioder fra 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 fartøy ligger til kai antas at propulsjon benyttes til å holde fartøy mot kai (eller for å opprettholde stram trosse) med en maskinkraft som er funksjon av fartøys størrelse. Det antas som utgangspunkt ikke bruk av landstrøm ved normal kortvarig kailigge. Tidsbruk ved kai

defineres som nødvendig tid til avstigning og påstigning (se kapittel 6.6) pluss en margin slik at total tidsbruk ved kai stemmer med tidstabell.

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

Elektrisk kraftbehov til hjelpesystemer og hotell er antatt å være 30% av normal belastning ved landligge over 30 minutters varighet.

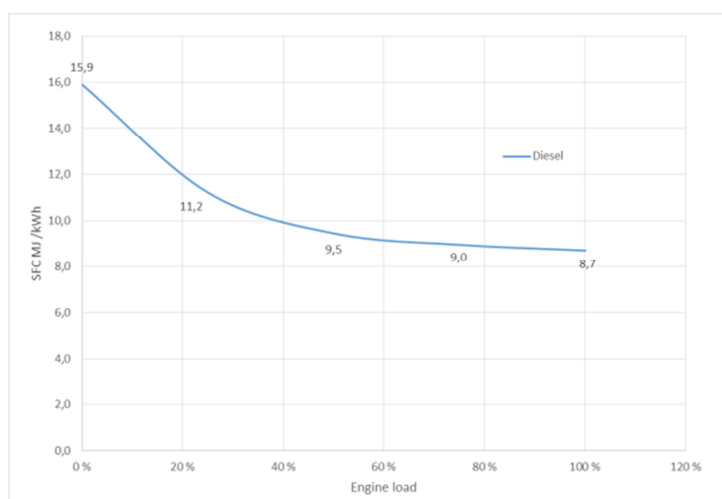
6.4 SPESIFIKT BRENNSTOFF FORBRUK

6.4.1 FREMDRIFT

Spesifikt brennstoff forbruk for 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 5% for å ta hensyn til mekanisk drevne pumper m.m. En benytter kurve for spesifikt brennstoff forbruk basert på variabelt motorturtall etter en propellerkurve ($P \sim n^3$).

Det benyttes kun en kurve for spesifikt brennstoff forbruk for hovedmotorene i dette studiet. En antar dermed at spesifikt forbruk ikke varierer med motors størrelse. Benyttet data er vist i figur 6-3.

Det legges på en antatt faktor på 15% 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 fartøyet når det benyttes mekanisk fremdrift.



Figur 6-3: Anvendt spesifikt forbruk for dieselmotor

6.4.2 HJELPEMASKINERI

Mindre hjelpemotorer benyttes til elektrisk kraftproduksjon for dieselmekanisk fremdriftsløsning. 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 hentes fra typiske leverandørdata. Samme tillegg på 5% som også benyttet for hovedmotorene for motorens mekanisk drevne pumper legges til.

Et spesifikt forbruk på 230 g/kWt (9,4 MJ/kWt) er benyttet for disse små dieseldrevne hjelpemotorer.²³

6.5 LETTSKIP OG DØDVEKT

6.5.1 LETTSKIP

Lettskip er fartøyets vekt uten last, forråd og drivstoff. For fartøy 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 båter. Utrustningsvekt for passasjerfasiliteter er en funksjon av en koeffisient ganget med antall kvadratmeter for passasjerer for den nye båten (som er selv funksjon av antall passasjerer). Maskineri og relaterte systemers vekt er funksjon av installert effekt ganget en koeffisient etc.

6.5.2 DØDVEKT/NYTTTELAST

Motstand beregnes for en gjennomsnittlig lastekondisjon karakterisert av:

- 50% passasjerkapasitet.
- Mannskap og forråd.
- Samtlige forbrukstanker halvfulle.

6.6 BRUKT TID I HAVN

Brukt tid til kai baseres på nødvendig tid for avstigning og påstigning av passasjerer og vil variere fra anløp til anløp da antall passasjerer varierer over døgnet og over uken (se kapittel 6.9). Det antas at hele båten tømmes før påstigning igangsettes. Passasjerer avstiger med en hastighet av 40 PAX/minutt og stiger om bord igjen med en hastighet av 50 PAX/minutt. I tillegg inkluderes tid til klargjøring for avstigning og for avgang innunder manøvrering (operere landgang med mer).

I digitalt verktøy kan bruker legge til eller trekke fra endring på $\pm 20\%$ i medgått tid til påstigning og avstigning av passasjerer 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 båten ligger til kai over 30 minutter, inkludert natt. Dette gjelder konsept uten aktiv lading av batteri fra el-nett.

6.7.2 HØYKAPASITET LANDSTRØM

For plugg-inn og batterikonsepter som benytter el-nettet til aktiv lading av batterier om bord i båten er det behov for store kapasiteter og det er behov for lading hver gang båten 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 båten er på en

²³ En forbrenningsmotors spesifikke forbruk angis i denne rapporten som forbrukt brennstoff i gram eller termisk energiinnhold (nedre brennverdi) per produserte mekanisk energi.

rundtur, og hurtigoverfører når den kommer til kai. En vil i dette studiet ikke gå videre inn på hvordan høykapasitet landstrøm tilrettelegges.

For konseptet som benytter høykapasitet 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 fartøy propulsjon til å holde seg i posisjon inntil kai. I denne studien antas at det medgår 10% av transitt effektbehov til dette formål når fartøy ligger til kai i opp til 30 minutters varighet. Ved lengre varighet antar en at båten fortøyres.

6.9 TRAFIKKVARIASJON OVER DØGNET OG UKEN

Det opplyses av bruker i digitalt verktøy et passasjerbelegg på ruten som forventes.

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

Tid ved kai avhenger som tidligere nevnt av antall passasjerer og det vil derfor beregnes lavere energiforbruk i rolige perioder når båtens transitt hastighet kan holdes nede på et minimum.

6.10 UTNYTTELSE OG LADING AV BATTERI

For å oppnå akseptabel levetid skal ikke et batteri brukes for hardt. Total kapasitet gitt i kWt er ikke å forstå som tilgjengelig kapasitet. I dette studiet vurderes lade/tømmerate på C2 og C3 som tilsvarer fullading innen henholdsvis 30 og 15 minutter. Eksempler i tabell 6-2 nedenfor illustrerer alternative kombinasjoner av landstrøm ladeeffekt og båtens batterikapasitet for et gitt behov per overfart på 100 kWt.

Energibehov per legg	100 kWt	100 kWt	100 kWt	100 kWt
Ladetid	10 min	10 min	5 min	5 min
Laderate	C2	C3	C2	C3
Ladeeffekt	600 kW	600 kW	1200 kW	1200 kW
Batterikapasitet	300 kWt	150 kWt	600 kWt	300 kWt

Tabell 6-2: Sammenheng mellom batteri utnyttelse, ladetid og laderate

En ønsker gjerne å lade med C1 for å sikre lang levetid, men en observerer at dette gir dobbelt så store batterier i fergen i forhold til C2 lading. Da batterier er svært tunge er det blir en forutsetning for hurtigbåter å basere seg på C2 eller til og med C3 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 men er gjerne enda tyngre. Endelig valg av laderate, ladeeffekt og batterikapasitet må gjøres med basis i et totalt kostnadsbilde inkludert eventuell utskifting av batterier gjennom båtens eller prosjektets levetid.

6.11 GENERELLE TILTAK

6.11.1 TILTAK FOR REDUSERT ENERGIFORBRUK TIL HJELPESYSTEMER OG HOTELL

Energiforbruk til hjelpesystemer og hotell for en tradisjonell dieselmekanisk båt 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 som 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 (dvs. elektrisk oppvarming vil være høyere for alternativer uten mulighet til å utnytte restvarme). 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, kioskutstyr 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».

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

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

Som tidligere nevnt er nytten av energieffektivisering for hotell- og hjelpesystemer marginal da dette er så lav andel av det totale energiforbruket.

6.11.2 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 drift: NO_x redusert fra 7,0 til 3,0 gNO_x/kWt

Urea forbruk regnes som 5% av tilhørende motors dieselforbruk.

6.12 INVESTERINGSKOSTNADER

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

6.12.1 TRADISJONELLE FERGER

I tabell 6-3 nedenfor er typiske anskaffelseskostnader angitt for tradisjonelle hurtiggående katamaraner og enkeltskrogfartøy.

Båt størrelse, PAX	Antatt investeringskostnad, 10 ⁶ NOK			
	Alu monohull	Karbon monohull	Alu katamaran	Karbon katamaran
50	15	20	20	25
100	20	25	25	30
150	25	30	30	40
200	35	40	40	50
250	45	50	50	60
300	55	60	60	70

Tabell 6-3: Antatt investeringskostnad for ulike typer katamaraner og enkeltskrogfartøy

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

6.12.2 BATTERIFARTØY

Det tas utgangspunkt i en dieselmekanisk. Deretter gjøres et fratrekk på 2500 NOK per installert kW maskineri. Dermed oppnås fratrekk for dieselmaskineriet (hovedmotorer og hjelpemotorer). Det legges til en pris på 4000 NOK per installert kW fremdriftsmotorer for det elektriske anlegget uten batterier (motorer, tavle, kabling etc.) Deretter legges det til en pris på 7.500 NOK/kWt batteri.

Dersom størrelse på skrog må justeres i forhold til normal fartøystørrelse for gitt PAX kapasitet skaleres skrogvekt i henhold til økte hoveddimensjoner.

I tillegg kommer kostnader på høykapasitet hurtigladeoppkopling dersom en legger opp til plugg-inn lading av batteri fra nett som definert i 6.12.5.

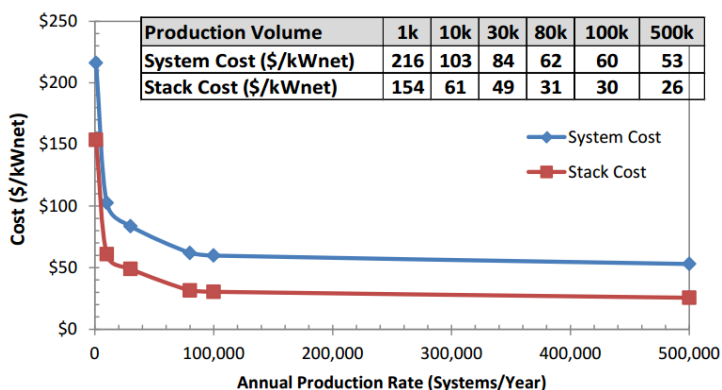
6.12.3 HYDROGENFARTØY

For hydrogenfartøy benyttes følgende kostandberegning fremgangsmetode:

- En tar utgangspunkt i dieselmekanisk fartøy.
- Det trekkes fra kostnader for dieselmaskineri på 2500 NOK/kW.
- Det legges til en pris på 4000 NOK per installert kW fremdriftsmotorer for det elektriske anlegget uten batterier (motorer, tavle, kabling etc.)
- Det legges til kostnader for hydrogen brenselceller på 14.000 NOK/kW (opplyst av Prototech).
- Deretter legges det til en pris på 7.500 NOK/kWt batteri.
- Det legges til kostnader for hydrogenlager trykktanker ved skalering relativt til kapasitet basert på eksempel i tabell 6-4 nedenfor og en installert kapasitet på ett dagsbehov med 20% margin.

- Det legges til antatte brenselcelle og hydrogenlager integrasjonskostnader på 20% av utstyrsverdier.

Det er i dag relativt stor usikkerhet knyttet til pris på brenselceller, da markedet preges av begrenset konkurranse og små produksjonsvolum. Antakelser for denne studien (rad 7 i tabell 1 i vedlegg C) er i stor grad basert på innhentede priser fra en rekke ulike leverandører, og inkluderer både brenselcellestacker og «Balance of Plant»-komponenter med tilhørende styringssystemer. Til sammenligning til disse prisene selges i dag Hyundai ix35 FCEV med 100 kW PEM brenselcellesystem for 499 000 NOK, som for hele bilen tilsvarer omtrent en tredjedel av prisen av kommersielt tilgjengelige PEM brenselcellemoduler. Viser US Department of Energys analyse av produksjonskostnader for 80 kW brenselcellesystemer som funksjon av antall produsert av enheter per år²⁴. Analysen viser både det store potensialet for kostnadsreduksjon ved økt produksjonsvolum, samt at markedsituasjonen gir stor differanse mellom potensiell produksjonskost og dagens salgspriser.



Figur 6-4: US Department of Energy analyse av produksjonskostnader for 80 kW PEM brenselcellesystemer som funksjon av antall produserte enheter per år²⁴

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 6-4: 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 hydrogenbåt er kostnadsestimering høyst usikkert, spesielt da det er knytt usikkerhet til omfang av sikkerhetstiltak som vil kreves fra myndigheter.

²⁴ Fuel Cell System Cost – 2015, J. Marcinkoski et.al. DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record 2015

I tillegg kommer kostnader på hydrogen bufferlagring og eventuell lokal produksjon på kai som definert i 6.12.6.

6.12.4 PRIS PER STØRRELSE FARTØY

Dersom pris på fartøy skal justeres mellom to kjente priser benyttes gjennomsnittlig pris per PAX som utgangspunkt.

6.12.5 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 7.500 NOK/kWt plus kostnad på 20 millioner NOK for pantografer (inkludert tilkopling på fartøy) plus installasjonskostnad på 20%.

Det antas da at aktuell input kapasitet fra nette er tilgjengelig på kai.

6.12.6 HYDROGEN BUNKRINGSANLEGG

Det antas ett hydrogen bunkringsanlegg på en av kaiene som fartøy opererer fra. Det legges her opp til bufferlager med trykkflasker på en dags forbruk i tillegg til produksjonsanlegg basert på elektrolyse av vann. Prising av lagringstanker etter samme prinsipp som gitt av 6.12.3 men 50% overkapasitet og prising av hydrogen produksjonsanlegg som 25.000 NOK per kapasitet (kg/døgn). Utover det legges på en installasjonskostnad på 20%.

6.12.7 GENERELLE TILTAK

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

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.

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 båt er langt mindre enn dette i størrelse.

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

Lavenergi kioskutstyr: Prisøkning på 50.000 NOK

Fjerne kiosk: Prisreduksjon på 300.000 NOK for kiosk.

6.13 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 : 5,5 NOK/liter

Elektrisitet fra nettet inkludert nettleie:	0,8 NOK/kWt
Biodiesel, B100 :	7,0 NOK/liter
Hydrogen :	40 NOK/kg

For hydrogen baserer en seg på produksjon basert på energi fra el-nettet til 0,8 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.

6.13.1 ANDRE BIODRIVSTOFF

Biometanol: Metanol er et drivstoff med lavere energitetthet enn tradisjonelle drivstoff, og foreløpig er kostnadene også høyere enn tradisjonelle drivstoff. Estimert kostnader for metanol er 17 USD/GJ for metanol laget av naturgass (Grindheim et al. 2015). Matzen et al. 2015 anslår at prisen for biomassebasert metanol er 2,3 ganger høyere enn naturgassbasert metanol. Det er heller ikke tilgjengelig infrastruktur for metanoldistribusjon, og dette vil også kreve investeringer. Ferje- og passasjerbåtsamband er gode utgangspunkt for slik utbygging, jf. LNG-utbygging for fergedrift.

Bioetanol: Etanol har litt høyere energitetthet enn metanol, men er likevel et drivstoff med betydelig lavere energitetthet enn tradisjonelle drivstoff. I følge Grindhaug et al. 2015 varierer prisen på etanol fra 23 USD/GJ til 31 USD/GJ avhengig om du vil ha 1. eller 2. generasjons etanol, og hvor i verden du kjøper dette i fra. Da etanol i tillegg har høye NO_x-utslipp at det vil være naturlig å tenke at det innføres NO_x-rensing. Grindhaug et al. 2015 også anslått en pris for NO_x-rensing på ca. 2 USD/GJ. Det er ikke tilgjengelig infrastruktur for metanoldistribusjon, og dette vil også kreve investeringer. Ferje- og passasjerbåtsamband er gode utgangspunkt for slik utbygging, jf. LNG-utbygging for fergedrift.

6.13.2 HYDROGENPRODUKSJON VED VANNELEKTROLYSE BASERT PÅ FORNYBAR KRAFT

Hydrogen produsert ved elektrolyse med bruk av fornybar kraft representerer et mulig nullutslippsdrivstoff for fartøy, og er derfor en foretrukket løsning sett i lys av mål om reduserte klimagassutslipp og utvikling av bærekraftige løsninger for transport. Tabell 6-5 viser sammenligning av egenskaper for ulike teknologier for elektrolyse²⁵, 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).

<i>Teknologi</i>	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 % ²⁶
<i>Elektrolyser pris per kW</i>	1000 - 1200 €	1900 - 2300 €	N/A

²⁵ Development of Water Electrolysis in the European Union, FCHJU, L Bertuccioli et. al., 2014

²⁶ Virkningsgrad kan økes ytterligere ved å tilføre varme

<i>Elektrolyser pris 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>	25 NOK/kg	25 NOK/kg	25 NOK/kg

Tabell 6-5: 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), elektrolyser, kompressor og ett mellomtrykkslager. Videre vil en fyllestasjon ta hydrogen fra mellomtrykkslager og komprimere (og eventuelt kjøle ned) til trykknivå i ferjen før det fylles over til lagertanker om bord. Tabell 2 Sammenligning av teknologi for hydrogenproduksjon ved elektrolyse viser at alkalisk elektrolyse er mest moden og gir lavest hydrogenpris på kort sikt (estimert om lag 50 kr per kg). På noe lengre sikt er pris per kg hydrogen (inkludert kompresjon og fylling) forventet å nå 25 kr per 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. Storskala elektrolyseanlegg direkte koblet til kraftkilde, for produksjon av hydrogen blant annet til bruk som komponent i kraftkrevende industri²⁷, vil være en potensiell «game changer» for å redusere kostnader for hydrogen og dermed gjøre hydrogen og brenselceller konkurransedyktig med konvensjonelle drivstoff.

²⁷ Startskudd for storskala hydrogenproduksjon, Sysla Grønn 2015, syslagronn.no/2015/10/16/syslagronn/startskudd-for-storskala-hydrogenproduksjon_64587/

7. BRUKERINSTRUKSJON – DIGITALT VERKTØY

7.1 DESCRIPTION

The Excel tool consists of 6 Excel sheets:

Ferry1	Ferry2	Ferry3	Summary	Speed Profile	Advanced Inputs
--------	--------	--------	---------	---------------	-----------------

The first three sheets are related to ferry definition and schedules that can be used for calculations. Each sheet represents one ferry. There can be up to 3 ferries operating in parallel.

Summary sheet is a table with graphs summarising consumption and others values calculated for the desired ferry combination over the week and for one year of operation.

Speed profile sheet is intended to plot the speed versus time for any of the 3 ferries on any day of the week. This can be useful to double check there are no mistakes in the schedule.

Then, Advanced Inputs sheet consists of a list of values that can be modified by expert user, if needed, and that will have an effect on results.

Cells that are intended to be modified by user have dark blue font and are filled with light blue color :

User inputs

7.2 FERRY SHEETS

7.2.1 FERRY & ROUTE DEFINITION

On the top left hand side of each ferry sheet, user can select from the database which type of ferry will be used in calculations. He can also set inputs/options related to ferry operation.

Select ferry concept:	200 Cata Carbon Fuel_Cell Elec
Main inputs:	
Switch to combi catamaran ? (only for 250 and 300 pas)	no
Use of electricity from shore in standby?	yes
Percentage of BioDiesel used (%)	0%
Trade area (sea margin)	2
Hybrid mode in harbour ? (Diesel mech only)	no
Controlable Pitch Propeller or Waterjet ?	CPP
Max C-rate	3
State of Charge (SoC) limit	90%
Depth of Discharge (DoD) limit	20%

First input is selection of ferry concept. Can be selected from database by user using dropdown list:

Select ferry concept:	200 Cata Carbon Fuel_Cell Elec
Main inputs:	<ul style="list-style-type: none"> 200 Cata Carbon Fuel_Cell Elec 200 Cata Alu Diesel Mech 200 Cata Alu Battery Elec 200 Cata Alu Fuel_Cell Elec 200 Mono Carbon Diesel Mech 200 Mono Carbon Battery Elec 200 Mono Carbon Fuel_Cell Elec 200 Mono Alu Diesel Mech
Switch to combi catamaran ? (only for 250 and 300 pax)	
Use of electricity from shore in standby?	
Percentage of BioDiesel used (%)	
Trade area (sea margin)	2
Hybrid mode in harbour ? (Diesel mech only)	no
Controlable Pitch Propeller or Waterjet ?	CPP
Max C-rate	3
State of Charge (SoC) limit	90%
Depth of Discharge (DoD) limit	20%

Inputs just below ferry selection can be modified and comments are available to explain the purpose of each input/option.

Select ferry concept:	200 Cata Carbon Fuel_Cell Elec
Main inputs:	
Switch to combi catamaran ? (only for 250 and 300 pax)	
Use of electricity from shore in standby?	If selected, energy needed on ferry in standby is taken from shore instead of gensets. Emissions are then reduced.
Percentage of BioDiesel used (%)	
Trade area (sea margin)	
Hybrid mode in harbour ? (Diesel mech only)	
Controlable Pitch Propeller or Waterjet ?	
Max C-rate	
State of Charge (SoC) limit	90%
Depth of Discharge (DoD) limit	20%

Below these options, a summary of information related to the ferry is available:

General information about ferry:	
Maximum pax capacity	150
Maximum car capacity (combi catamaran only)	0
Hull type	Cata
Material	Carbon
Propulsion type	Diesel Mech
Length over all (m)	24
Beam moulded (m)	7,95
Depth (m)	2,6
Hotel load in operation (kW)	17,7
Hotel load in standby (kW)	5,3
Total time (h) / week	0,0
Stop time (h) / week	0,0
Operating time (h) / week	0,0



- Go to Tuesday
- Go to Wednesday
- Go to Thursday
- Go to Friday
- Go to Saturday
- Go to Sunday

Also, when schedule is constant over the week, a button allows to copy Monday schedule to other week day to save time.

Copy Monday to other week days

First step is to fill departure time and arrival time. In general, times have to be written with hh:mm:ss format (h : hours / m : minutes / s : seconds). Then crossing distance has to be defined for each leg. When ferry has to sail at lower speed in specific areas, distance crossed in such areas and speed can be defined. All these inputs will allow the transit speed to be calculated.

Departure	Arrival	Crossing time	Crossing distance overall (m)	Distance at reduced speed (m)	Reduced speed (kts)	Time at reduced speed
5:00	5:15	00:15:00	12 000	500	10	00:01:37
5:30	5:45	00:15:00	12 000	500	10	00:01:37
6:00	6:15	00:15:00	12 000	500	10	00:01:37
6:30	6:45	00:15:00	12 000	500	10	00:01:37
7:00	7:15	00:15:00	12 000	500	10	00:01:37
7:30	7:45	00:15:00	12 000	500	10	00:01:37
8:00	8:15	00:15:00	12 000	500	10	00:01:37
8:30	8:45	00:15:00	12 000	500	10	00:01:37
9:00	9:15	00:15:00	12 000	500	10	00:01:37
9:30	9:45	00:15:00	12 000	500	10	00:01:37
10:00	10:15	00:15:00	12 000	500	10	00:01:37
10:30	10:45	00:15:00	12 000	500	10	00:01:37
11:00	11:15	00:15:00	12 000	500	10	00:01:37
11:30	11:45	00:15:00	12 000	500	10	00:01:37

Regarding passenger(cars) load, it can be filled using dedicated columns. Knowing how many passengers (cars) get off/on the ferry allows boarding/unboarding time to be estimated. Then user can defined how long the ferry stays at quay based on this estimate:



Pax boarding at arrival	Pax unboarding at arrival	Onboard pax during crossing	Cars boarding at arrival	Cars unboarding at arrival	Onboard cars during crossing	Estimated pax boarding + unboarding time	Estimated car boarding + unboarding time	Total time at quay
20	20	100	0	0	0	00:00:54	00:00:00	00:10:00
20	20	100	0	0	0	00:00:54	00:00:00	00:10:00
20	20	100	0	0	0	00:00:54	00:00:00	00:10:00
20	20	100	0	0	0	00:00:54	00:00:00	00:10:00
20	20	100	0	0	0	00:00:54	00:00:00	00:10:00
20	20	100	0	0	0	00:00:54	00:00:00	00:10:00
20	20	100	0	0	0	00:00:54	00:00:00	00:10:00
20	20	100	0	0	0	00:00:54	00:00:00	00:10:00
20	20	100	0	0	0	00:00:54	00:00:00	00:10:00
20	20	100	0	0	0	00:00:54	00:00:00	00:10:00
20	20	100	0	0	0	00:00:54	00:00:00	00:10:00
20	20	100	0	0	0	00:00:54	00:00:00	00:10:00
20	20	100	0	0	0	00:00:54	00:00:00	00:10:00
20	20	100	0	0	0	00:00:54	00:00:00	00:10:00
20	20	100	0	0	0	00:00:54	00:00:00	00:10:00

Last step is to define docking type and time at rest/standby. Docking type has an impact on manoeuvring time, and thus on transit speed. Docking by front is supposed to be more efficient than side docking. Standby column allows user to define how much time ferry is at rest, for instance during the night or long stops. During these stops, no passengers are on board, ferry is moored, and hotel load is reduced.

Total time at quay	Docking type	Stops / Rest / Standby
00:10:00	Front	0:00
00:10:00	Front	0:00
00:10:00	Front	0:00
00:10:00	Front	0:00
00:10:00	Front	0:00
00:10:00	Front	0:00
00:10:00	Front	0:00
00:10:00	Front	0:00
00:10:00	Front	0:00
00:10:00	Front	0:00
00:10:00	Front	0:00
00:10:00	Front	0:00
00:10:00	Front	0:00
00:10:00	Front	8:00

Be careful that stop times are in the same row as a trip, otherwise it will not be taken into account. For instance, picture on the left below is correct, and means that ferry will stop operating after the trip, and will stay at quay 8 hours. Picture on the right shows bad definition of stop time which is not linked to the trip and then will not be taken into account.



15	16	17	--	--	--
Total time at quay	Docking type	Stops / Rest / Standby	Total time at quay	Docking type	Stops / Rest / Standby
00:10:00	Front	0:00	00:10:00	Front	0:00
00:10:00	Front	0:00	00:10:00	Front	0:00
00:10:00	Front	0:00	00:10:00	Front	0:00
00:10:00	Front	0:00	00:10:00	Front	0:00
00:10:00	Front	0:00	00:10:00	Front	0:00
00:10:00	Front	0:00	00:10:00	Front	0:00
00:10:00	Front	0:00	00:10:00	Front	0:00
00:10:00	Front	0:00	00:10:00	Front	0:00
00:10:00	Front	0:00	00:10:00	Front	0:00
00:10:00	Front	0:00	00:10:00	Front	0:00
00:10:00	Front	0:00	00:10:00	Front	0:00
00:10:00	Front	0:00	00:10:00	Front	0:00
00:10:00	Front	0:00	00:10:00	Front	0:00
00:10:00	Front	8:00	00:10:00	Front	0:00
00:00:00	Front	0:00	00:00:00	Front	0:00
00:00:00	Front	OK	00:00:00	Front	0:00
00:00:00	Front	0:00	00:00:00	Front	0:00
00:00:00	Front	0:00	00:00:00	Front	0:00
00:00:00	Front	0:00	00:00:00	Front	0:00
00:00:00	Front	0:00	00:00:00	Front	0:00
00:00:00	Front	0:00	00:00:00	Front	0:00
00:00:00	Front	0:00	00:00:00	Front	0:00
00:00:00	Front	0:00	00:00:00	Front	0:00

Again, comments are available to explain the purpose of schedule columns:

4	Sailing distance in specific areas during crossing such as channels where speed has to be reduced .Cannot be higher than crossing distance.			
Distance at reduced speed (m)				
500				
500	10	00:01:37	20	
500	10	00:01:37	20	
500	10	00:01:37	20	
500	10	00:01:37	20	

To help the user enter the schedule, buttons shown below can be pressed to fill automatically the value written just below. Also, user can clear the whole column by pressing clear buttons like shown below :



Clear column

Fill column with value below :

20

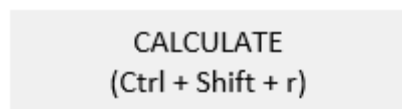
7

Pax boarding at arrival

20
20
20
20
20
20
20
20

7.2.3 RESULTS

In Summary excel sheet, results are calculated after clicking on “Calculate” button available in the sheet, or in any ferry sheet. This might take up to 4 seconds maximum to run all calculations.



Also, user can press “Ctrl + Shift + r” to run the calculations instead of pushing the button.

Ferries that should be included (or not) in calculations can be selected by user on top of summary table:

	Included in calculations?	
Ferry 1 :	yes	-> 200 Cata Carbon Fuel_Cell Elec
Ferry 2 :	yes	-> 200 Cata Carbon Diesel Mech
Ferry 3 :	no	-> 200 Cata Carbon Battery Elec

For each day, results for each ferry are given as well as the sum of the three ferries.

Week day	MONDAY			
	Ferry 1	Ferry 2	Ferry 3	Total
Ferry ID				
Fuel consumption (kg)	414	97		511
Fuel consumption (l)	13 102	114		13 216
Fuel energy consumption (MJ)	49 143	4 124		53 266
Fuel cost (NOK)	16 560	629		17 189

Week results are summarized the same way on the right hand side of the table, as well as results over one year:



WEEK				YEAR			
Ferry 1	Ferry 2	Ferry 3	Total	Ferry 1	Ferry 2	Ferry 3	Total
2 898	97		2 995	150 699	5 022		155 721
91 711	114		91 825	4 768 968	5 943		4 774 911
344 000	4 124		348 124	17 888 018	214 425		18 102 443
115 923	629		116 551	6 027 976	32 685		6 060 661

If some of the ferries operating have the same schedule, user can copy/paste automatically schedule from one ferry to another using dedicated button above the summary table:



APPENDIX A : BEGREPSFORKLARINGER

Asynkron motor:	Tradisjonell type elektromotor
Batterielektrisk drift:	Fremdriftsløsning for fartøy basert på energi fra batteri som leveres til elektromotor som igjen driver propell
Batterisyklus:	Gjentagende uttapping og opplading av batteri
Bauganløp:	Anløp mot kai hvor fartøy legger til med baug
Biodrivstoff:	Drivstoff som er fremstilt av en eller annen form for biomasse eller annet biologisk produkt
Brakett:	Stag som holder propellaksel på plass
Brenselcelle:	Anordning som er i stand til å omforme brennstoff direkte til elektrisitet
Bufferbatterier:	Batterier plassert på land som er med på å øke landstrømkapasitet dersom el-nettet ned til kai har begrenset kapasitet og fartøy har behov for større ladestrømmer.
Bunkringsintervall:	Tidsintervall mellom hver gang fartøy må fylle på diesel, hydrogen, elektrisitet eller tilsvarende
Bunnreis:	Oppadgående skråvinkel på skipsskrog i tversgående retning
Bæreevne:	Den vekten som et fartøy er i stand til å bære og samtidig kunne yte som forutsatt. Overstiges et fartøys bæreevne så er det overlastet.
CFD analyse:	Computer Fluid Dynamics – en analysemetode programvare baseres på for å beregne et fartøys motstand, dvs. hvor stor kraft som skal til for å dra fartøyet gjennom vannet.
CO ₂ :	Karbondioksid
Demoprojekt:	Demonstrasjonsprosjekt, typisk en første gangs realisering av en løsning for å demonstrere at den virker som forutsatt
Deplasementsskrog:	En type skrog som er ment å holde samme dybde selv under fart. Det motsatte av et skrog som løfter seg opp når det går i høy hastighet.
Dieselmekanisk drift:	Drift av propell basert på dieselmotor som direkte driver propellaksel (vanligvis gjennom et gir med kløtsj)
Dual fuel:	Et begrep for en motor som kan anvende to ulike typer brennstoff, eksempelvis naturgass eller diesel
Dynamisk løft:	Begrep for et skrog som løfter seg opp når det går i fart. Dynamisk løft er da kraften som løfter skroget opp. Også populært kalt et planende skrog
Dynamo:	Begrep for en elektrisk generator som produserer likestrøm. Normalt montert på en motor via en kilereim eller tilsvarende
Dødvekt:	Begrep for vekten av nyttelast for et fartøy. For hurtigbåt vil dette si vekten av brennstoff, ferskvann, mannskap, passasjerer, bagasje etc.
Effektbehov:	Krav til effekt for en gitt operasjonsmode eller tilstand. Typisk behov for motoreffekt for fartøy for å oppnå en definert fart.
Ekstrudert:	Teknikk for å produsere profiler i aluminiumslegeringer. Metallet blir «trykt» eller ekstrudert gjennom en form og får påtvunget samme geometri.
Elektrisk tap:	Effekttap gjennom et elektrisk anlegg. Typisk oppstår effekttap i form av varmeavgivelse fra alle hovedkomponenter i et elektrisk anlegg inkludert batteri, kraftkabler, fordelingstavle, omformer og motor.
Elektrolyse:	En elektrokjemisk prosess hvor påført elektrisitet påtvinger en kjemisk reaksjon. I denne sammenheng påført elektrisitet for å produsere hydrogen fra vann.
Energibærer:	Et begrep for metoder å lagre energi i større mengder for senere bruk. Hydrogen er eksempel på en energibærer. Hydrogen finnes ikke naturlig og må produseres. Dersom hydrogen produseres ved bruk av elektrisitet

Energieffektivisering:	så blir det hydrogenet som «bærer» den elektriske energien frem til tidspunkt når den skal brukes. Energibærer må ikke forveksles med brennstoff hvor det energiholdige råstoffet finnes i naturen. Begrep for reduksjon av energibehov for en gitt arbeidsoppgave. Eksempelvis reduksjon av energiinnhold for å holde en gitt temperatur i en passasjersalong.
Enkeltskrogsfartøy:	Et fartøy med kun ett skrog.
Flaggstat:	Et begrep for sjøfartsmyndigheter som i denne sammenheng er Sjøfartsdirektoratet
Forbrenningsmotor:	En motor som baserer seg på eksplosiv forbrenning av et drivstoff eller en energibærer for å omdanne drivstoffets termiske energi til rotasjonsenergi
Fossilt brensel:	Et brennstoff som er fremstilt av utvunnet olje eller gass
Frekvensstyring:	Et begrep for turtallskontroll av en elektromotor
Fremdriftslinje:	Et begrep for drivlinjen på et fartøy fra eksempelvis dieselmotor via kløtsj, gir, aksel og til propell
Fremdriftsløsning:	Et begrep for type fremdriftslinje. Kan være med propell eller vannjett, med dieselmotor eller elektromotor. Benytter i denne sammenheng begrep som dieselmekanisk eller batterielektrisk fremdrift som benevnelse for ulike fremdriftsløsninger.
Fremdriftsmotor:	Motor som besørger effekt til å få fartøy til å bevege seg fremover
Friksjonssveising:	Metode for sveising av aluminiumslegeringer som baserer seg på varmeutvikling fra friksjon av roterende verktøy mot metallet
Gangbro:	Begrep for den broen som passasjerer benytter for å gå mellom fartøy og kai. Også kalt gangvei eller landgang.
Gassolje:	Begrep for høykvalitets dieselolje som normalt benyttes for hurtigbåter
Generatorsett:	Begrep for en dieselmotor som driver en elektrisk generator
Gir:	Anordning med tannhjul innvendig som i denne sammenheng eksempelvis benyttes til å redusere turtall fra en dieselmotor og ned til passende turtall for propell.
HC:	Hydrokarbon
Hjelpemaskineri:	Dieselmotor, vanligvis et generatorsett, som benyttes til å produsere effekt til andre forbrukere enn propulsjon
Hjelpesystemer:	Systemer om bord i et fartøy som er nødvendig for å holde fartøy og spesielt maskineriet gående. Typisk et kjølevannsystem med pumpe som pumper sjøvann inn i motor for å unngå overoppheting
Hotell:	Begrep for de effektbehov på et passasjerfartøy som er knyttet til passasjer og mannskapsområder. Typisk ventilasjon med vifte for passasjersalong
Hoveddimensjoner:	Et fartøys hoved ytre mål som lengde, bredde og skrogs dybde
Hovedmaskineri:	Maskineriet om bord i et fartøy som besørger effekt til propulsjon eller alt effektbehov om bord. For dieselmekanisk løsning er motorene som driver propell hovedmotorer. For en dieselelektrisk løsning er det dieselgeneratorene som er hovedmotorer.
Hurtigbåt:	Normalt et begrep for et lettbygde og relativt lite fartøy (ikke skip) som går med hastighet over 20 knop
Hurtigbåtterminal:	Stoppestasjon for hurtigbåt hvor passasjerer går av og på
Hurtigløpende motor:	Begrep for en dieselmotor som går med relativt høyt omdreiningsturtall. Slike motorer benyttes for hurtigbåter da de er mer lettbygde enn motorer med lavere turtall. Normalt er turtall på motorer for hurtigbåter fra 1800 rpm (omdreininger per sekund) til 2400 rpm.

Hydrodynamisk:	Begrep for vannets fysiske interaksjon med skrog, ror, propell etc. Hydrodynamikk er et begrep for hvordan en beregner et skrogs egenskaper i vannet
IMO:	International Maritime Organization, en del av FN systemet
Impeller:	Et begrep for en skovle eller «propell» inne i en pumpe og i denne sammenheng relevant for vannjett
Karbonsandwich:	Konstruksjonsmetode for skrog baser på oppbygging i tre lag, en skumkjerne som er dekket av laminat på hver side. Skumkjernen er typisk 20 – 50 mm tykk og laget av et plastsium som danner distanse mellom laminatene. Laminatene er hoved styrkebarende elementer i konstruksjonen og består av karbonfiber som er støpt inn i en plast.
Kaste loss:	Betyr å løsne fortøyning og dra fra kai
Katalysator:	En kjemisk prosess hvor det benyttes et stoff til å fremkalle prosessen, men hvor stoffet i seg selv ikke inngår i den kjemiske omdannelsen. I denne sammenheng aktuelt for Urea som benyttes for å rense ut NO _x fra eksosgass.
Katamaran:	Et fartøy som har to skrog
Kiming:	Langskips «Hjørne» på et skrog
Klimabelastning:	Grad av klimagasser som avgis, i denne sammenheng først og fremst klimagassen CO ₂
Klimagass:	Gass som bidrar til drivhuseffekten og i denne sammenheng først og fremst CO ₂ . Metan, CH ₄ er også en klimagass mens NO _x kun bidrar til lokalforurensing og er ikke en klimagass.
Klimautslipp:	Først og fremst utslipp av CO ₂ i denne sammenheng
Klasse:	Begrep for klasseinstitusjon som er en organisasjon som spesielt gjør tredjepartsgjennomganger og godkjenninger av skipsdesign, skipsbygging og skipsdrift. Det Norske Veritas er eksempel på en slik organisasjon
Kløtsj:	Anordning som i denne sammenheng benyttes for å kople motor fra propell
Kombinatorkurve:	Innprogrammert logaritme i kontrollsystem som sørger for at motorturtall og vinkel på propellblad for vribar propell forløper seg på gunstig måte under akselerasjon av fartøy opp i fart
Konkurranspreget dialog:	Spesiell form for anbudsprosess egnet for ny teknologi hvor løsning utvikles eller tilpasses i dialog med kunde gjennom anbudsprosessen
Kontraroterende propell:	Propulsjonsløsning med to propeller som står etter hverandre på samme aksel og roterer i motsatt retning. Gir høy virkningsgrad da noe av rotasjonsenergi som vanligvis går tapt blir gjenvunnet
kW:	kilowatt
Ladeanlegg:	Anlegg på kai for lading av batterier om bord i fartøy
Laderate:	Hvor stor ladestrøm en benytter for å lade et batteri relativt til batteriets størrelse. Det benyttes ofte et begrep C-rate hvor C1 tilsvarer fullading i løpet av 1 time, C2 tilsvarer fullading i løpet av en ½ time osv.
Laminat:	Begrep for en komposittplate hvor fiber er innstøpt i plast, i vårt tilfelle karbonfiber som er innstøpt i venylester
Landgang:	Begrep for den broen som passasjerer benytter fro å gå mellom fartøy og kai. Også kalt gangvei eller gangbro.
Landstrøm:	Strøm som tas fra kai for å holde systemer i fartøy i drift eller for å lade batterier om bord i fartøy
LED:	Energieffektivt prinsipp for belysning, Light Emitting Diode

Lettskip:	Et begrep for skipets vekt før nyttelast eller dødvekt er tatt om bord, altså vekten av et skip uten drivstoff, ferskvann, mannskap, passasjerer, bagasje etc.
LHV:	Lower Heating Value, mål for energiinnhold i et brennstoff målt som varmeenergi som blir produsert om en brenner drivstoffet
LNG:	Liquid Natural Gas, flytende naturgass
Manøvrering:	Begrep for å «styre» et fartøy inn og ut fra kai
Maskinerikonsept:	Type maskineriløsning som dieselmekanisk, dieselelektrisk, batterielektrisk eller hydrogen brenselcelledrift.
Materialtæring:	Begrep for erodering av material, i dette tilfellet erodering av metall i propell som følge av for høy belastning og tilhørende «koking» eller undertrykksfordamping av vann
Mekaniske tap:	Begrep for effekttap i en fremdriftslinje, typisk tap i from av varmeavgivelse i gir og akselopplagring
Metallhydrid:	En form for metallpulver som er i stand til å binde til seg hydrogen for lagring og avgir hydrogenet igjen ved oppvarming
Miljøutslipp:	Fellesbegrep for utslipp av miljø- og klimagasser som SO _x , NO _x og CO ₂ .
MJ:	Megajoule, en måleenhet for energiinnhold
Modelltest:	Test av et skipsskrog i nedskalert størrelse i et stort innvendig basseng for å beregne skipets motstand og fremdriftsegenskaper før det er bygd.
MPa:	Megapascal, en måleenhet for stivhet, spenningsnivå eller belastningsnivå i en konstruksjon
NO _x :	Nitrogenoksider
NO _x rensing:	Anordning for rensing an NO _x fra avgasser/eksos
Nullutslippsløsning:	Løsning som i seg selv ikke slipper ut klimagasser, i dette tilfellet batterielektrisk og hydrogen brenselcelledrift
Operasjonsmode:	Begrep for en tilstand fartøy er i som transitt, manøvrering, til kai etc.
PAX:	Forkortelse for passasjer
PEM:	Prinsipp for brenselcelle, Proton Exchange Membrane
Permanentmagnetmotor:	Prinsipp for elektromotor som gir relativt kompakt og lettvekts løsning og derav aktuell for hurtigbåter
Pilotprosjekt:	Alternativ begrep for demoprojekt. Demonstrasjonsprosjekt, typisk en første gangs realisering av en løsning for å demonstrere at den virker som forutsatt
Plastkompositt:	Konstruksjon bygget opp av fiberarmert plast, i dette tilfellet karbonsandwich
Plugg-inn hybrid:	Et begrep for en løsning hvor en kombinerer dieselelektrisk og batterielektrisk drift. Typisk vil en andel av effektbehovet dekkes av batterier og resterende av dieselgeneratorer. Aktuelt i tilfeller hvor en av hensyn til landstrøm ladekrav eller batteristørrelser ikke er i stand til å lage en ren batterielektrisk løsning
Propulsjonsløsning:	Type løsning for å fremskaffe skyvekraft til fartøy, i dette tilfelle propell eller vannjett
Propulsjonsvirkningsgrad:	Begrep for hvor mye av tilført effekt til propulsor som blir omdannet til skyvekraft (resterende går som varmetap til vann). For en optimal løsning med vribar propell er det mulig å få opp mot 75% av tilført effekt omdannet til skyvekraft
Prøvetursdata:	Målinger av fart, effektforbruk etc. ved test av et nytt fartøy før det er overlevert fra verft til reder.
PVC:	Polyvenylklorid, plaststoff som i dette tilfellet benyttes som herdet skum i kjernen av karbonsandwich konstruksjonen

R&D:	Research & Development, også kalt F&U på norsk (forskning og utvikling)
Rekkevidde:	Strekning eller sum av strekninger som et fartøy må dekke mellom hver bunkring av diesel, hydrogen eller landstrøm
Restvarme:	Begrep som benyttes for oppvarmet kjølevann fra motor som kan benyttes til oppvarmingsformål om bord i fartøy
Risikoanalyse:	Utredning eller gjennomgang etter definert mønster for å identifisere risikomomenter f.eks. som ny teknologianvendelse er beheftet med. Inngår ofte som del av godkjenningsprogram ovenfor Sjøfartsmyndigheter for nye løsninger i fartøy
Ror:	Anordning for å styre et fartøy
Rullebevegelse:	Vinkelbevegelse på et fartøy i tversgående retning
Rute:	Et forhåndsbestemt mønster som et fartøy opererer etter, for oss passasjerer gitt i en rutetabell
Sideanløp:	Når fartøy legger til kai med skipssiden
Sideskrog:	Ett av to skrog i en katamaran
Sjøfartsmyndigheter:	Sjøfartsdirektoratet for norske fartøy
Skrogkonsept:	Type skrog, i dette tilfellet enkeltskrog eller katamaran
Skroglinjer:	Begrep for 3D geometri av et skrog
Skrogmotstand:	Slepekraft som er nødvendig for å få et skrog opp i en definert hastighet
Skyvekraft:	Den kraften som en propulsor (propell eller vannjett) er nødt til å produsere for at fartøyet skal oppnå en definert hastighet
SO _x :	Svoveloksider
Speilet:	Den vertikale endeveggen i et skrog, også kalt hekken på et fartøy
Spesifikt brennstofforbruk:	En motors brennstofforbruk per produserte energimengde, ofte angitt som g/kWt
Stiver:	Avstivningselement for en platekonstruksjon, benyttes for aluminiumskrog hvor hudplate avstives av innvendige profiler
Styrekraft:	Sidekraft som et ror eller annen manøverinnretning produserer for å styre et fartøy
Styremaskineri:	Anordningen som får et ror eller annen styreinnetning til å bevege seg
Tavle:	Begrep for skap om bord i fartøy som fordeler elektrisk effekt fra produserende enhet (generator eller batteri) og til de ulike forbrukerne
Termisk energiinnhold:	Begrep for mengde varmeenergi som et brennstoff innehar. I motorer er det bare en andel av denne som lar seg omforme til rotasjonsenergi
Termisk isolering:	Isolering for å hindre varmetap i et rom
Termisk virkningsgrad:	Andel av termisk energi som blir omdannet til rotasjonsenergi i en motor. Typisk vil en klare å omdanne 35% i en dieselmotor
Transitt:	Etappe eller strekning mellom to stopp i en rute
Transmisjonsløsning:	Mekanisk løsning for å overføre rotasjonsenergi fra f.eks. motor til propell. Transmisjonsløsning består da av kløtsj, gir og aksel.
Trosse:	Tau som en fortøyer fartøy til kai med
Turtall:	Omdreiningshastighet for motor eller propell
Turtallsregulering:	Variasjon av omdreiningshastighet
Vakuuminjisering:	Metode hvor vakuum under forsegling benyttes for i dette tilfellet å væte eller mette karbonfiber med flytende venylester slik at det etter herding blir et laminat.
Vannjett:	Propulsjonsenhet hvor en pumpe benyttes til å akselerere opp sjøvann for å produsere skyvekraft
Venylester:	Herdeplast som benyttes for karbonsandwich konstruksjonsmateriale
Vribar propell:	Propell hvor bladene kan vris til ønsket stigning. Kan også vris helt om slik at propell gir reverseringskraft



VIP salong:	Spesielt luksuriøst innredet passasjersalong
Virkningsgrad:	Andel av effekt som blir overført (resterende blir tap)
Viskøse tap:	Effekttap i en viskøs kopling, et alternativ til en platekløtsj hvor effekt overføres mellom to turbinhjul i en lukket «beholder» med olje

APPENDIX B : BIODRIVSTOFF NOTAT FRA NORSK ENERGI

Det finnes mange forskjellige typer alternative drivstoff, men få er utprøvd i maritim sektor. Biomassebaserte drivstoff har hovedsakelig blitt brukt til landtransport, hvor både bioetanol og biodiesel er tilgjengelig på fyllestasjoner. I maritim transport har biomassebaserte drivstoff ikke vært like tilgjengelig som de har vært i landtransport, men økt fokus på utslipp gjør at tilgjengeliggjøring og bruk av alternative drivstoffer blir stadig mer aktuelt.

I denne studien er det valgt å fokusere på seks alternative drivstoff. Disse er:

- Biodiesel
- Biometanol
- Flytende biogass (LBG)
- Bioetanol
- Elektrisitet
- Hydrogen

For drivstoffene er det fokusert på egenskapene til drivstoffene, produksjonsprosessen, kostnader, tilgjengelighet og motortyper drivstoffene harmoniserer med.

Biodiesel (fornybar diesel):

Biodiesel kan produseres med både første og andre generasjons teknologier. Biodiesel kan enten produseres gjennom transesterifisering (1. generasjon) av vegetabiliske oljer, eller gjennom gassifisering med på påfølgende Fischer-Tropsch syntese (2. generasjon). Mange forskjellige produkter kan brukes i produksjonen av biodiesel, bl.a. kokosnøtt, soyabønner, alger, solsikkeolje, palmeolje, rapsolje, fiskeoljer og organisk avfall.

Eco-1 2G Marine er en form for biodiesel som har veldig like egenskaper som 2. generasjons biodiesel, og er tilgjengelig på det norske markedet. 2G Marine produseres ved hydrogenering av vegetabiliske oljer basert på avfall og restfraksjoner, og kan brukes direkte uten tiltak på dieselmotorer.

Det har vært vanskelig å finne eksakte data for Eco-1 2Gs egenskaper når det gjelder utslipp, men Eco-1 hevder selv at sammenlignet med konvensjonell diesel vil bruk av 2G Marine redusere utslipp av klimagasser med 83 prosent. I dette ligger det også at partikkelutslipp reduseres med 33 prosent, CO-utslippene med 24 prosent, HC-utslipp med 30 prosent, og NO_x-utslipp med 10 prosent. 2G Marine er i komposisjon veldig likt 2. generasjons BTL (Bio to Liquid), og på grunn av denne likheten er det i studien valgt å bruke data fra Bengtsson et al. 2012 for BTL som en proxy for utslipp fra biodiesel.

Når det gjelder kostnader har det vært vanskelig å innhente eksakte data. Oslo-Fergene som frakter passasjerer til øyene i Indre Oslofjord har siden desember 2015 gått på 2G Marine. Det opplyses at den fornybar dieselen er dyrere for Oslo-ferjene, men størrelsesnivået her er usikkert.

Biometanol:

Biometanol, tradisjonelt kalt tresprit, er som navnet tilsier, en alkohol basert på tre. Produksjonen av metanol er en industriell prosess og per tid produseres metanol vanligvis av naturgass. Metanol kan også baseres på biomasse, og det er denne biomassebaserte metanolen som inkluderes i denne studien.

Utslippsmessig har metanol en bra profil sammenlignet med tradisjonelle drivstoff. Når metanol er basert på biomasse vil det ved forbrenning være CO₂-nøytralt. Metanol vil i tillegg ikke ha utslipp av SO₂, og sterkt redusere utslipp av NO_x. Data for utslipp fra metanol i denne studien er basert på analyser av Bengtsson et al. 2012, hvor modellert metanolproduksjonen baserer seg på trevirke og skogsavfall.

Bruken av metanol som marint drivstoff er nesten uprøvd, og per tid står det svenske rederiet Stena og et samarbeid mellom det norske Westfal-Larsen og svenske Marininvest shipping i front når det gjelder utprøving av metanol som drivstoff. Metanolen som brukes her er etter all sannsynlighet naturgassbasert, men rederiene vil kunne legge om til biomassebasert metanol på et senere tidspunkt. Bruk av metanol som drivstoff krever en dual fuel motor.

Metanol er et drivstoff med lavere energitetthet enn tradisjonelle drivstoff, og foreløpig er kostnadene også høyere enn tradisjonelle drivstoff. Estimert kostnader for metanol er 17 USD/GJ for metanol laget av naturgass (Grindheim et al. 2015). Matzen et al. 2015 anslår at prisen for biomassebasert metanol er 2,3 ganger høyere enn naturgassbasert metanol. Det er heller ikke tilgjengelig infrastruktur for metanoldistribusjon, og dette vil også kreve investeringer. Ferge- og passasjerbåtsamband er gode utgangspunkt for slik utbygging, jf. LNG-utbygging for fergedrift.

Flytende biogass (LBG):

Flytende biogass er et drivstoff som deler de fleste karakteristikker med flytende naturgass, utenom at biogassen har biologisk opphav i stedet for fossilt. Biogass produseres ved anaerob nedbrytning av biomasse og rensing/oppgradering av råmetanen som produseres under den anaerobe nedbrytningen til drivstoffkvalitet.

LBG vil, som biometanol og fornybar diesel, redusere CO₂-utslipp betraktelig da CO₂'en som slippes ut har biologisk opprinnelse, og regnes som nøytral. Flytende biogass består likevel av omtrent 98-99 % metan, en klimadriver som er 28 ganger mer potent enn CO₂. Det vil kunne oppstå metanlekkasje i forbindelse med bruk av LBG som drivstoff, og dette reflekteres gjennom høyere klimautslipp. Data for utslipp fra LBG i denne studien er basert på analyser av Bengtsson et al. 2012.

Bruk av LBG som marint drivstoff er under utprøving, og fasiliteres av at LBG kan brukes direkte på gassmotorer som tidligere har gått på LNG, uten ombygginger. Tilgjengeligheten til LBG antas å øke ved økt etterspørsel. Kostnadmessig er det vanskelig å anslå hva LBG vil koste, men det antas at kostnaden initialt vil være høyere enn tradisjonelle drivstoff, men vha. subsidier og økt effektivitet kan det antas at kostnaden vil reduseres over tid.

Bioetanol:

Etanol er som metanol en type alkohol, og er den alkoholen som finnes i drikkevarer som øl, vin og brennevin. Etanol produseres ved fermentering og eller destillering. Bioetanol produseres med basis i biomasse, men deler ellers alle karakteristika med fossil etanol.

Bioetanol vil, som de andre drivstoffene inkludert i denne studien, redusere CO₂-utslipp betraktelig da CO₂'en som slippes ut har biologisk opprinnelse, og regnes som nøytral. Bioetanol vil i tillegg ikke ha utslipp av SO₂, men skiller seg fra de andre drivstoffene i denne studien ved at NO_x-utslipp ikke reduseres, og kanskje til og med øker. Data for utslipp fra bioetanol i denne studien er basert på utslippsdata i databasen Ecoinvent samt beregninger av Grindhaug et al. 2015. For NO_x- og partikkelutslipp har det vært vanskelig å oppdrive eksakte data, men det antas med god sikkerhet at partikkelutslipp reduseres sammenlignet med tradisjonelle drivstoff, og NO_x-utslipp øker.

Etanol som drivstoff er velprøvd i landtransport gjennom innblanding av etanol i bensin. E85 er for eksempel en blanding av 15 % bensin og 85 % bioetanol. I marin sammenheng er etanol som drivstoff er nærmest uprøvd. Ved bruk av ren bioetanol vil det kreves en dual fuel motor.

Etanol har litt høyere energitetthet enn metanol, men er likevel et drivstoff med betydelig lavere energitetthet enn tradisjonelle drivstoff. I følge Grindhaug et al. 2015 varierer prisen på etanol fra 23 USD/GJ til 31 USD/GJ avhengig om du vil ha 1. eller 2. generasjons etanol, og hvor i verden du kjøper dette i fra. Da etanol i tillegg har høye NO_x-utslipp at det vil være naturlig å tenke at det innføres NO_x-rensing. Grindhaug et al. 2015 også anslått en pris for NO_x-rensing på ca. 2 USD/GJ. Det er ikke tilgjengelig infrastruktur for metanoldistribusjon, og dette vil også kreve investeringer. Ferje- og passasjerbåtsamband er gode utgangspunkt for slik utbygging, jf. LNG-utbygging for fergedrift.

Alle utslippsdata er oppsummert i tabell 1.

Referanser

Bengtsson, S., Fridell, Erik., Andersson, Karin.: Environmental assessment of two pathways towards the use of biofuels in shipping. Energy Policy 44, 2012, 451-463.

Grindhaug, A., Slettemark, S., Rummelhoff, E. K.: Alternativt drivstoff til skip. Høgskolen Stord/Haugesund. 2015.

Matzen, M., Demirel, Y.: Life Cycle Assessment of Biomethanol. Conference paper 2015.
https://www.researchgate.net/publication/282672175_Life-Cycle_Assessment_of_Biomethanol

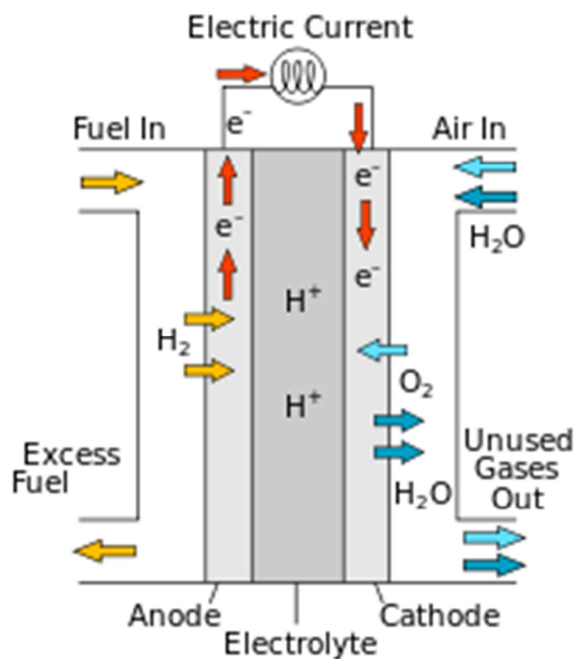
Tabell 1: utslipp fra biodrivstoff

	Enhet	Produksjon	Forbrenning	Total	MJ/kg	tonn utslipp/tonn drivstoff		
						Produksjon	Forbrenning	Total
Biodiesel (BTL)	CO ₂ -ekvivalenter (g/MJ)	15,88	1,10	16,98	37,00	0,59	0,04	0,63
	Fossil CO ₂ (g/MJ)	15,00	-	15,00	37,00	0,56	-	0,56
	Biologisk CO ₂ (g/MJ)	0,14	70,00	70,14	37,00	0,01	2,59	2,60
	NO _x (g/MJ)	0,15	0,17	0,32	37,00	0,01	0,01	0,01
	SO ₂ (g/MJ)	0,03	0,00	0,03	37,00	0,00	0,00	0,00
	PM ₁₀ (g/MJ)	0,01	0,01	0,02	37,00	0,00	0,00	0,00
Biometanol	CO ₂ -ekvivalenter (g/MJ)	18,34	-	18,34	20,00	0,37	-	0,37
	Fossil CO ₂ (g/MJ)	17,00	-	17,00	20,00	0,34	-	0,34
	Biologisk CO ₂ (g/MJ)	120,00	69,00	189,00	20,00	2,40	1,38	3,78
	NO _x (g/MJ)	0,06	0,28	0,34	20,00	0,00	0,01	0,01
	SO ₂ (g/MJ)	0,05	-	0,05	20,00	0,00	-	0,00
	PM ₁₀ (g/MJ)	0,01	0,00	0,02	20,00	0,00	0,00	0,00
LBG	CO ₂ -ekvivalenter (g/MJ)	32,58	24,10	56,67	44,00	1,43	1,06	2,49
	Fossil CO ₂ (g/MJ)	27,00	-	27,00	44,00	1,19	-	1,19
	Biologisk CO ₂ (g/MJ)	97,00	52,00	149,00	44,00	4,27	2,29	6,56
	NO _x (g/MJ)	0,05	0,11	0,16	44,00	0,00	0,00	0,01
	SO ₂ (g/MJ)	0,07	0,00	0,07	44,00	0,00	0,00	0,00
	PM ₁₀ (g/MJ)	0,02	0,00	0,02	44,00	0,00	0,00	0,00
Bioetanol	CO ₂ -ekvivalenter (g/MJ)	0,05	-	0,05	26,00	1,26	-	1,26
	Fossil CO ₂ (g/MJ)	-	-	-	26,00	-	-	-
	Biologisk CO ₂ (g/MJ)	-	0,07	0,07	26,00	-	1,91	1,91
	NO _x (g/MJ)	-	-	-	26,00	-	-	-
	SO ₂ (g/MJ)	-	-	-	26,00	-	-	-
	PM ₁₀ (g/MJ)	-	-	-	26,00	-	-	-

APPENDIX C : HYDROGEN OG BRENSSELCELLETEKNOLOGI NOTAT FRA CMR PROTOTECH

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 et fartøy. 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.

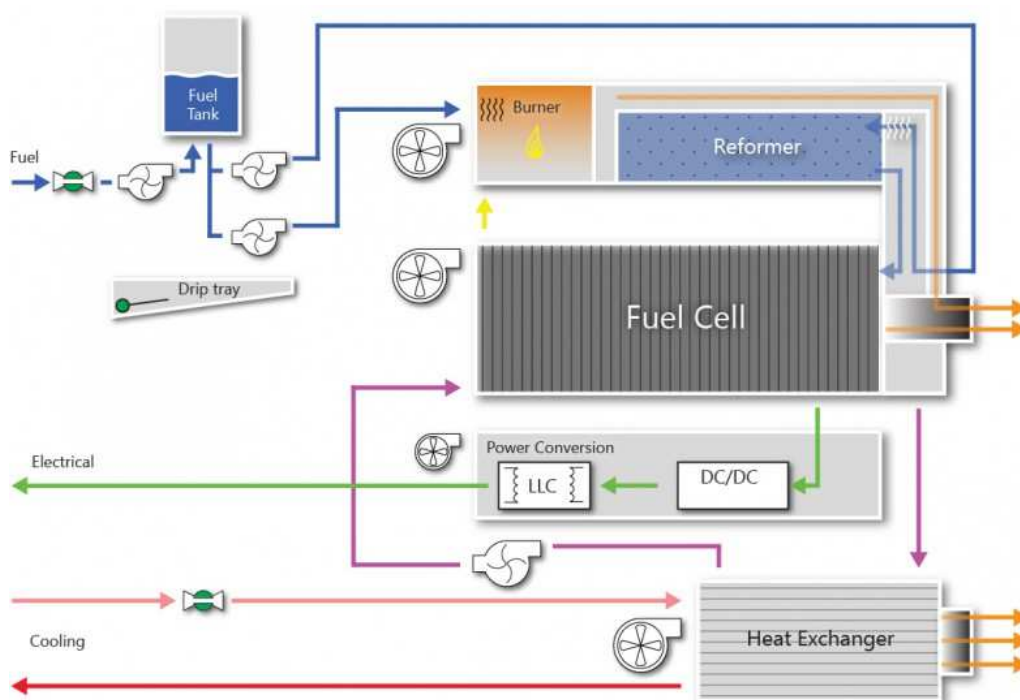
De fleste brenselcelleteknologier benytter hydrogen som drivstoff. Elektrisk kraft produseres ved at hydrogen og oksygen fra luft kombineres til vann og energi ($H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O + el + \text{varme}$). Hydrogendrevne brenselceller representerer dermed en framdriftsteknologi uten 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 maritim fremdrift.



Figur 1 Virkemåte PEM brenselcelle. Protoner ledes gjennom membran mens elektroner går i elektrisk krets. Hydrogen og oksygen fra luft reagerer på katoden og former vann.

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, i motsetning til batterisystemer hvor behov for dobbel mengde energi betyr dobbel mengde batterier. Ved større energibehov, eksempelvis for lengre overfarter eller høyere overfartshastighet, vil derfor brenselcellesystemer kunne gi vekt- og kostnadsbesparelser i forhold til ren batteridrift. Hydrogendrevne brenselceller representerer dermed en mulig nullutslippsløsning for strekninger hvor ren batteridrift ikke er praktisk gjennomførbart eller hensiktsmessig (grunnet høy vekt eller manglende ladeinfrastruktur/kapasitet).

I tillegg til å lagre og tilføre hydrogen direkte til brenselcellene, kan også andre typer brensel som inneholder hydrogen, for eksempel naturgass (CH_4), (bio)metanol (CH_3OH) og (bio)etanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$), 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 ($600 - 1000^\circ\text{C}$) kan denne reformeringen ta sted direkte i cellene, slik at f.eks. LNG, biometanol etc. kan benyttes som drivstoff direkte. Ved bruk av hydrokarboner/alkoholer som bærer for hydrogen, vil en (uten CO_2 -fangst) 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.



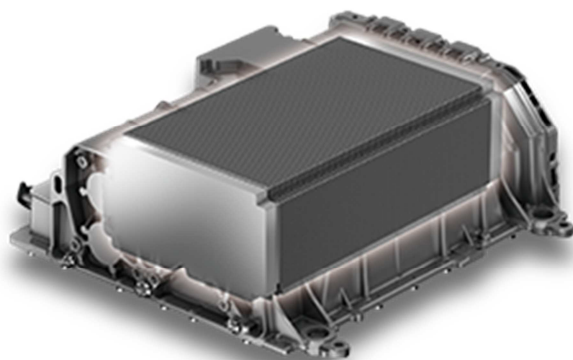
Figur 2 Brenselcellesystem med metanol som drivstoff²⁸. Reformert omdanner metanol og vann til hydrogen (som benyttes i brenselcellen) og CO_2 .

ULIKE BRENSSELCELLETEKNOLOGIER OG LØSNINGER

Det finnes en rekke ulike brenselcelleteknologier, som hver har ulike fordeler og ulemper. Tabell 1²⁹ gir en oversikt over ulike teknologier med vurdering av anvendbarhet i passasjerbåter. 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. Innen PEM brenselceller skiller en også gjerne mellom kompakte enheter optimalisert for biler, og såkalte Heavy Duty moduler optimalisert for busser, tog, o.l., hvor høy virkningsgrad og levetid er viktigere enn fotavtrykk og rask respons.

²⁸ Reformed Methanol System (Serenergy), serenergy.com/forside-test/technology/reformed-methanol-system/

²⁹ Comparisons of Fuel Cell Technologies, <http://energy.gov/eere/fuelcells/comparison-fuel-cell-technologies>, 2014



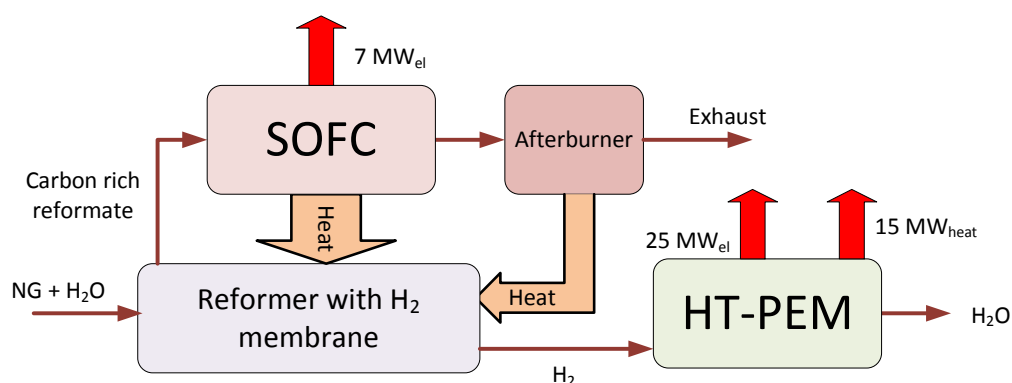
Figur 3 Toyota PEM fuel cell stack



Figur 4 Hydrogenics Heavy Duty PEM fuel cell modul

Ved bruk av (bio)metanol/-etanol som drivstoff vil det også være aktuelt å ta i bruk høytemperatur (HT) PEM brenselceller, blant annet da denne teknologien er mindre sensitiv til urenheter i hydrogenet som kommer fra reformeren, sammenlignet med lavtemperatur PEM. I tillegg gir økt temperatur (opererer på om lag 150 - 180°C) mulighet for noe høyere virkningsgrad, både for selve brenselcellen samt at varme fra brenselcellen kan benyttes til reformeringsprosessen.

For større, tyngre fartøy enn hurtigbåter, kan SOFC (Solid Oxide Fuel Cell)-teknologi på sikt være et attraktivt alternativ, gjerne i kombinasjon med PEM brenselceller og batterier. SOFC brenselceller opererer på om lag 600 - 1000°C, har høy virkningsgrad (opp mot 70%) og kan i tillegg til ren hydrogen operere på andre drivstoff (f.eks. naturgass³⁰). I tillegg gir den høye temperaturen mulighet til effektiv utnyttelse av restvarme, og dermed videre øke systemets totale virkningsgrad. En potensiell løsning som i dag er under utvikling blant annet rettet mot kraftforsyning offshore og subsea er basert på en kombinasjon av SOFC og HPEM teknologi. Fordelen med et slikt system er at varme fra SOFC brenselcellen benyttes til reformering av naturgass til hydrogen og reformatgass. Hydrogen benyttes da som brensel i en HPEM brenselcelle mens CO fra reformatgassen benyttes som drivstoff i SOFC brenselcellen. Systemet produserer dermed strøm, restvarme (på ~160°C), vanddamp, samt ren CO₂ som relativt enkelt kan lagres.

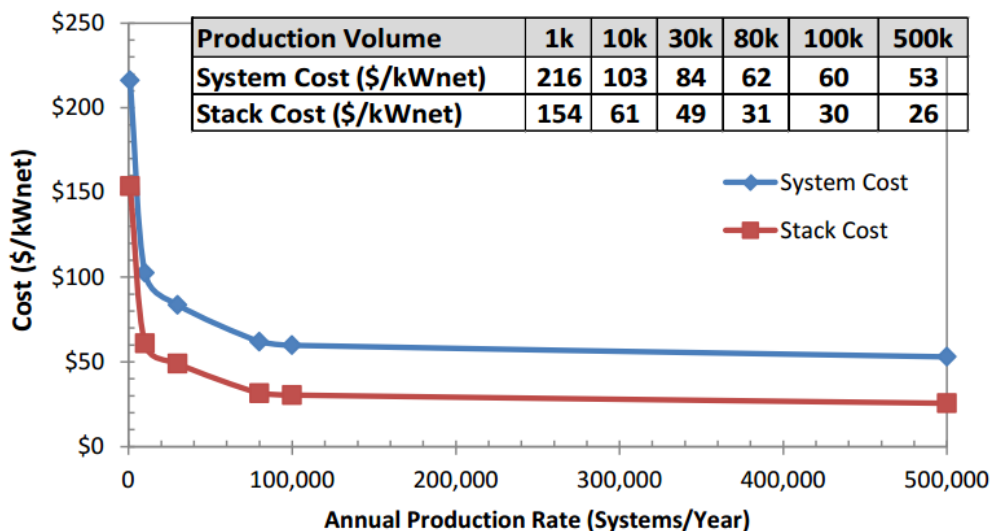


Figur 5 Clean Highly Efficient Offshore Power (CHEOP) system

Det er i dag relativt stor usikkerhet knyttet til pris på brenselceller, da markedet preges av begrenset konkurranse og små produksjonsvolum. Antakelser for denne studien (rad 7 i Tabell 1) er i stor grad basert på innhentede priser fra en rekke ulike leverandører, og inkluderer både brenselcellestacker og «Balance of Plant»-komponenter med tilhørende styringsystemer. Til sammenligning til disse prisene selges i dag Hyundai

³⁰ Karbonmonoksid (CO) fra reformat fungerer som brensel i SOFC-celler

ix35 FCEV med 100 kW PEM brenselcellesystem for 499 000 NOK, som for hele bilen tilsvarer omtrent en tredjedel av prisen av kommersielt tilgjengelige PEM brenselcellemoduler. Viser US Department of Energys analyse av produksjonskostnader for 80 kW brenselcellesystemer som funksjon av antall produsert av enheter per år²⁴. Analysen viser både det store potensialet for kostnadsreduksjon ved økt produksjonsvolum, samt at markedssituasjonen gir stor differanse mellom potensiell produksjonskost og dagens salgspriser.



Figur 6 US Department of Energy analyse av produksjonskostnader for 80 kW PEM brenselcellesystemer som funksjon av antall produserte enheter per år³¹

Det finnes en rekke prosjekter hvor hydrogen og brenselceller er tatt i bruk i maritim virksomhet. Et kjent eksempel er det norske forskningsupply-skipet Viking Lady³² har installert og demonstrert 330 kW brenselceller (MCFC, LNG som drivstoff) som APU (Auxiliary Power Unit) om bord. Tidligere har CMR Prototech installert hydrogendrevet brenselcelle/batterihybridsystem på passasjerbåten MF Vågen 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 e4ships³³. Hydrogendrevne PEM brenselceller er også i dag i bruk i ubåter³⁴

³¹ Fuel Cell System Cost – 2015, J. Marcinkoski et.al. DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record 2015

³² Fellowship - Viking Lady, <http://vikinglady.no/>

³³ e4ships – fuel cells in marine applications, <http://www.e4ships.de/e4ships-home.html>

³⁴ Type 212 submarine, https://en.wikipedia.org/wiki/Type_212_submarine



Figur 7 FC Alsterwasser, Hamburg



Figur 8 MF Vågen, Bergen

I avsnitt 0 er energiforbruk, vekt, volum og kostnad for ulike løsninger for brenselcelledrift beregnet. Som utgangspunkt er ruten Tromsø – Harstad benyttet, og beregninger utført for PEM og HTPEM brenselcelleteknologi med komprimert og flytende hydrogen samt (bio)metanol/(bio)etanol som drivstoff.

FCteknologi	PEM	Alkalisk	HTPEM	PAFC	MCFC	SOFC
Typiske anvendelser	- Transport - Reservekraft - Desentralisert kraft	- Militær - Romfart - Reservekraft - Transport	- Reservekraft - Desentralisert kraft - Maritim (APU) [§] - Romfart	- Desentralisert kraft	- Desentralisert kraft - Storskala kraftproduksjon - Maritim (APU) [§]	- 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	60-70 %	55-65 %	60 - 70 %	40-50 %	50 - 60 %	65 - 75 %
Pris per kW	1 800 \$	3 000 €	4 000 €	4 300 \$	4 000 \$	10 000 €
Estimert pris per kW 2020^{§,§}	800 \$	2 000 €	2 000 €	4 000 \$	4 000 \$	3 000 €
Estimert pris per kW 2025^{§,§}	400 \$	1 500 €	1 000 €	2 000 \$	2 000 \$	1 500 €
Fordeler	- Moden teknologi - Rask oppstart og responstid - 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 (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 og respons	- Lang oppstartstid - Høy pris - Lav virkningsgrad	- Lav energitetthet (per vekt og volum) - Lang oppstartstid	- Krever teknologitvilling (prisreduksjon, levetid) - Høy temperatur krever varnehåndtering - Lang oppstartstid - Høy vekt/volum
Vurdering bruk i passasjerbåter	- Godt egnet	- Middels godt egnet	- Middels godt egnet (på kort sikt). Godt egnet på lengre sikt	- Lite egnet	- Lite egnet	- Mindre godt egnet

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

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

^{§§} Molten Carbonate and Phosphoric Acid Stationary Fuel Cells: Overview and Gap Analysis, R. Remic, D. Wheeler, 2010

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. splitte 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 vannkraft, noe som har ført til at Norsk Hydro, nå videreført i NEL Hydrogen, er verdensledende på (alkalisk) elektrolyse-teknologi. 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 komprimert gass, som flytende hydrogen (nedkjølt til -253°C) eller som metallhydrid, dvs. kjemisk bundet til metaller. Komprimert 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, noe som gjør at effektive systemer med relativt høy energitetthet kan designes ved å utnytte varme fra brenselceller (fortrinnsvis høytemperatur brenselceller). Samtidig er metallhydridteknologi i dag forbundet med høy pris og vekt, og derfor ikke ansett som aktuelt for passasjerbåter med større lagringsbehov. Grunnet høyere energitetthet enn komprimert gass vil flytende hydrogen kunne være aktuelt for hurtigbåter med høyt energibehov og begrenset plass til lagring. I Norge eksisterer det derimot i dag ingen anlegg for produksjon av flytende hydrogen. På kort sikt er derfor trykksatt hydrogen ansett å være det mest aktuelle lagringsalternativet for hydrogen til bruk i passasjerbåter.

Hydrogen kan også, som beskrevet innledningsvis, lagres kjemisk i andre stoffer som naturgass/andre hydrokarboner eller (bio)metanol/etanol. Hydrogen må da hentes ut gjennom en reformeringsprosess, og en vil også ha lokale karbonutslipp (med mindre CO_2 -lagringsteknologi kan benyttes). Fordelen med å benytte andre drivstoff er forenklet lagring om bord (lavere trykk og opptar mindre volum), og at en til en viss grad kan benytte eksisterende infrastruktur for tanking. For hurtiggående passasjerbåter anses (bio)metanol/etanol som attraktive drivstoff, grunnet relativt lav systemvekt og -volum sammenlignet med ren hydrogen. Ved bruk av metanol som drivstoff reduseres de direkte utslippene av SO_x med ca. 99%, NO_x med 60%, partikler med 95% og CO_2 med 25% sammenlignet med konvensjonelt drivstoff³⁵. Det er i dag et økende fokus på bruk av metanol som drivstoff i skipsfart for å svare på nye utslippskrav. Eksempler (forbrenningsmotorer) er Stena Line sin 32 MW ferje mellom Gøteborg og Kiel, samt Waterfront Shipping-tankskip (to av dem levert av Westfal-Larsen)^{36, 37}.

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. Det er derfor identifisert et behov for å gjennomføre fullskala demoprojekt, for å opparbeide erfaring og hvor en parallelt vil kunne utvikle nødvendig regelverk og klassekrav som senere kan forenkle prosessen med godkjenning av nye fartøy.

³⁵ Stena Line launches the world's first methanol ferry, news.stenaline.co.uk/pressreleases/stena-line-launches-the-world-s-first-methanol-ferry-1137516

³⁶ Supergreen, <http://www.stenaline.com/en-GB-corp/corporate/environment/supergreen-en>

³⁷ Dette skipet skal bli grønnere med sprit på tanken, <http://maritime.no/nybygg/dette-skipet-skal-bli-gronnere-med-sprit-pa-tanken/>

Hydrogenproduksjon ved vannelektrolyse basert på fornybar kraft

Hydrogen produsert ved elektrolyse med bruk av fornybar kraft representerer et mulig nullutslippsdrivstoff for fartøy, og er derfor en foretrukket løsning sett i lys av mål om reduserte klimagassutslipp og utvikling av bærekraftige løsninger for transport. Tabell 2 Sammenligning av teknologi for hydrogenproduksjon ved elektrolyse viser sammenligning av egenskaper for ulike teknologier for elektrolyse³⁸, 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).

Teknologi	Alkalisk	PEM	SOEC
<i>Modenhhet</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 % ³⁹
<i>Elektrolyser pris per kW</i>	1000 - 1200 €	1900 - 2300 €	N/A
<i>Elektrolyser pris 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>	25 NOK/kg	25 NOK/kg	25 NOK/kg

Tabell 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), elektrolyser, kompressor og et mellomtrykklager. Videre vil en fyllestasjon ta hydrogen fra et mellomtrykklager og komprimere (og eventuelt kjøle ned) til trykknivå i ferjen før det fylles over til lagertanker om bord. Tabell 2 viser at alkalisk elektrolyse er mest moden og gir lavest hydrogenpris på kort sikt (estimert om lag 50 kr per kg). På noe lengre sikt er pris per kg hydrogen (inkludert kompresjon og fylling) forventet å nå 25 kr per 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. Storskala elektrolyseanlegg direkte koblet til kraftkilde, for produksjon av hydrogen blant annet til bruk som komponent i kraftkrevende industri⁴⁰, vil være en potensiell «game changer» for å redusere kostnader for hydrogen og dermed gjøre hydrogen og brenselceller konkurransedyktig med konvensjonelle drivstoff.

³⁸ Development of Water Electrolysis in the European Union, FCHJU, L Bertuccioli et. al., 2014

³⁹ Virkningsgrad kan økes ytterligere ved å tilføre varme

⁴⁰ Startskudd for storskala hydrogenproduksjon, Sysla Grønn 2015, syslagronn.no/2015/10/16/syslagronn/startskudd-for-storskala-hydrogenproduksjon_64587/

Teknisk løsning og beregnet kraft- og energiforbruk for hurtigbåt Tromsø-Finnes-Harstad

Som grunnlag for utarbeidelse av teknisk løsning og beregninger for brenselcelledrevet hurtiggående passasjerbåt er tekniske og operasjonelle spesifikasjoner for ruten Tromsø-Finnes-Harstad⁴¹ benyttet. Hurtigbåten er av typen CarbonCat 35m med 2 x 1080 kW fremdriftsmotorer + 2 x 35 kW generatorsett til hotellast. I beregninger for brenselcelledrift er det antatt samme kraftbehov som i dag, samt følgende virkningsgrader for kraftoverføring:

Komponent	Virkningsgrad
Elektrisk motor	96 %
Trafo	98 %
Konverter	99 %
Strømtavle	99 %
Generator	96 %
Aksling	99 %
Batteri	99 %

Tabell 3 Virkningsgrad kraftoverføring

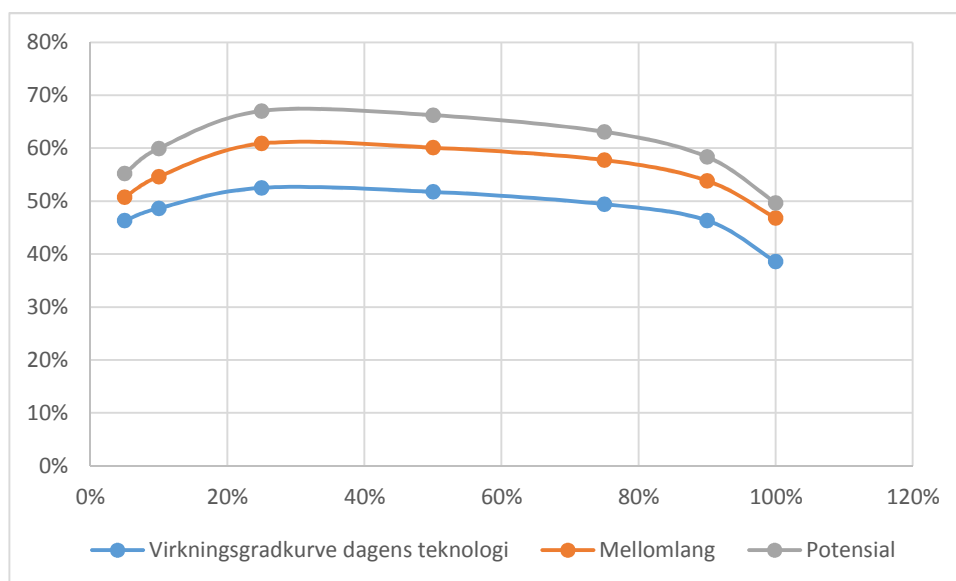
Videre er det antatt 100% last (kraftforbruk) ved normal overfartshastighet, og 10% last ved stopp og i saktegående traseer. Tidtabeller gjeldende fra 04.01.2016 er lagt til grunn, og antatt 10 minutt kjøring ved lav hastighet per stopp. Dette gir total lastfaktor på 80% for én tur. Det totale energibehovet fra brenselcellene blir da 5673 kWh per tur, og i snitt tre turer per dag.

Spesifikasjon	Verdi	Enhet
Effekt diesel motor	2160	kW
Effekt generatorsett for hotell/aux-last	70	kW
Fremdriftseffekt	2138	kW
Hotell/aux-last	66	kW
Ekstra installert brenselcellekraft	10 %	
Kraftbehov brenselceller	2364	kW
Installert makseffekt brenselceller	2600	kW
Installert kapasitet batteripakke	100	kWh
Tid per tur Tromsø-Harstad	3	h
Antall stopp	4	
Last ved kai/sakte fart	10 %	
Last overfart	100 %	
Estimert tid ved kai/sakte fart per tur	40	min
Estimert tid normal fart	140	min
Beregnet gjennomsnittlig last	80 %	
Energibehov fra brenselceller per tur	5673	kWh

Tabell 4 Spesifikasjoner og beregnet energibehov per tur for hurtigbåt på traseen Tromsø-Finnes-Harstad

⁴¹ Rute 2 Tromsø – Finnes – Harstad, <http://www.tromskortet.no/2-tromso-finnes-harstad/category323.html>

For å beregne drivstoffbehov til brenselceller er følgende variasjon av virkningsgrad med last lagt til grunn (dagens teknologi, samt forventet teknologiutvikling på mellomlang og lang sikt):



Figur 9 Virkningsgrad brenselcellemoduler

Drivstoffkostnader er beregnet på bakgrunn av priser vist i Tabell 5^{42,43,44,45}. Det er antatt hhv. 50, 35 og 25 NOK/kg for komprimert hydrogen (GH₂) i 2016, 2020, og 2025. Videre er det antatt 30% høyere pris for flytende hydrogen (LH₂)⁴⁶. Dollarkurs på 8 NOK/\$ og eurokurs på 9 NOK/€ er benyttet.

Drivstoff (NOK/kWh)	2016	2020	2025
GH ₂	1,52	1,06	0,76
LH ₂	1,97	1,38	0,98
Metanol	0,37	0,37	0,37
Biometanol	0,86	0,77	0,60
Bioetanol	0,53	0,53	0,53

Tabell 5 Antatte drivstoffpriser (NOK/kWh). Hydrogen og biometanol er ventet å bli billigere på bakgrunn av utvikling av infrastruktur. Pris på metanol fra naturgass er her antatt lik over tid (eventuell karbonprising er ikke tatt med).

Fremdriftssystemet for et brenselcelledrevet fartøy vil bestå av drivstofftanker, brenselcellemoduler med kjølesystem/lufttilførsel, batteripakker, DCDC omformere, DC bus, DCAC omformere, elektromotorer og thrustere/propeller. Ved bruk av metanol/etanol er også en reformer inkludert⁴⁷. Lavtemperatur PEM brenselceller er fleksible i forhold til oppstart og lastvariasjoner og er dermed i stor grad i stand til å dekke en hurtigbåts lastprofil. Det er derfor beregnet inn en relativt liten batteripakke (100 kWh) for å ta raske variasjoner i kraftforbruk, samt fungere som en redundans til brenselcellesystemet dersom noe skulle skje og det er behov for et reservesystem for å ta båten til land. For komprimert hydrogen er det antatt to turer per

⁴² Methanol price (valid April 1, 2016 – June 30, 2016), www.methanex.com

⁴³ Current Methanol Price, <http://www.domesticbiosolutions.com/get-involved/>,

⁴⁴ Ethanol market, <http://www.tradingeconomics.com/commodity/ethanol>

⁴⁵ Methanol as Marine Fuel, P. Fagerlund, Symposium on Evolution of Marine Fuels, Los Angeles 2014

⁴⁶ Investeringskostnader knyttet til etablering av anlegg for flytende hydrogen er ikke vurdert

⁴⁷ Antatt 50 % virkningsgrad på metanol/etanol-reforming i 2016, og 60 % for metanol fra 2020

ylling, noe som gir en til to fyllinger per dag. For flytende drivstoff er det tatt utgangspunkt i daglig fylling. Tabellene nedenfor viser beregnet systemmasse (uten drivstoff), systemvolum, og kostnader for brenselcellesystem på ruten Tromsø-Finnes-Harstad.

	Masse (kg)	Spesifikk energi (Wh/kg)	Volum (l)	Energitetthet (Wh/l)	Investeringskost (NOK/år)	Årlige drivstoffutgifter (NOK/år)	Årlige utgifter drivstoff, investering (10 år), vedlikehold (NOK/år)
<i>GH₂</i>	30 620	408	87 703	142	41 605 333	19 480 456	24 238 002
<i>LH₂</i>	12 317	1 520	38 888	481	44 471 588	25 324 593	30 397 427
<i>Metanol</i>	10 476	1 787	22 971	815	94 796 200	4 634 805	15 243 347
<i>Biometanol</i>	10 476	1 787	22 971	815	94 796 200	9 090 723	19 699 265
<i>Bioetanol</i>	10 476	1 787	22 971	815	94 726 570	7 346 983	17 947 865

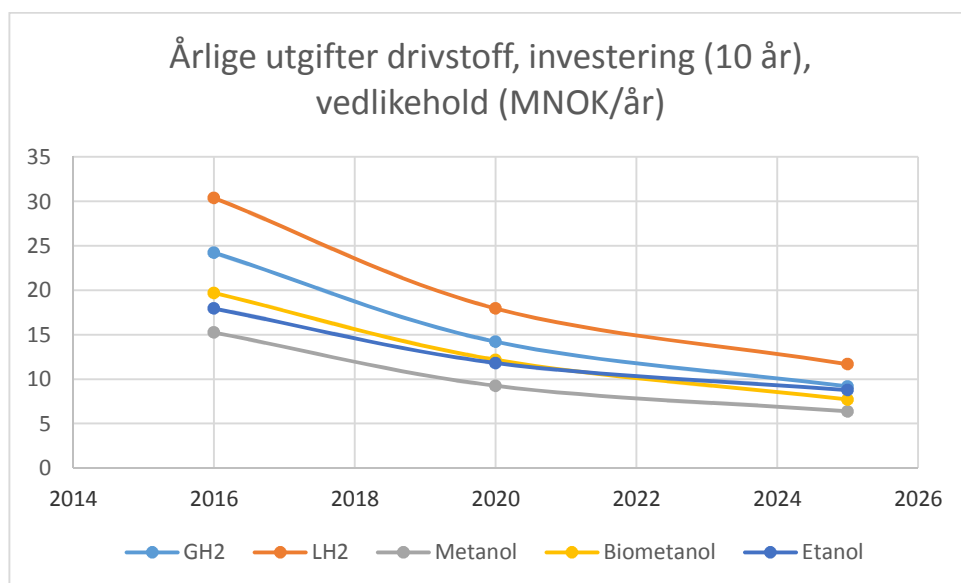
Tabell 6 Systemmasse, -volum, investeringskostnader, drivstoffutgifter, og totale årlige utgifter for brenselcellefartøy på ruten Tromsø-Finnes-Harstad. Beregninger er gjort for Komprimert hydrogen, flytende hydrogen, metanol, biometanol og bioetanol

	Masse (kg)	Spesifikk energi (Wh/kg)	Volum (l)	Energitetthet (Wh/l)	Investeringskost (NOK/år)	Årlige drivstoffutgifter (NOK/år)	Årlige utgifter drivstoff, investering (10 år), vedlikehold (NOK/år)
<i>GH₂</i>	17 282	722	64 626	193	19 705 600	11 868 663	14 212 247
<i>LH₂</i>	7 728	2 422	20 156	929	21 352 558	15 429 261	17 954 011
<i>Metanol</i>	6 809	2 749	14 930	1 254	47 765 906	3 821 686	9 251 904
<i>Biometanol</i>	6 809	2 749	14 930	1 254	47 765 906	6 746 282	12 176 499
<i>Bioetanol</i>	6 809	2 749	14 930	1 254	47 721 985	6 394 604	11 819 990

Tabell 7 Systemmasse, -volum, investeringskostnader, drivstoffutgifter, og totale årlige utgifter på mellomlang sikt

	Masse (kg)	Spesifikk energi (Wh/kg)	Volum (l)	Energitetthet (Wh/l)	Investeringskost (NOK/år)	Årlige drivstoffutgifter (NOK/år)	Årlige utgifter drivstoff, investering (10 år), vedlikehold (NOK/år)
<i>GH₂</i>	10 646	1 172	55 988	223	10 069 333	7 902 162	9 178 268
<i>LH₂</i>	5 977	3 132	17 139	1 092	11 250 836	10 272 810	11 678 882
<i>Metanol</i>	4 647	4 028	11 188	1 673	24 095 921	3 562 273	6 381 304
<i>Biometanol</i>	4 647	4 028	11 188	1 673	24 095 921	4 890 938	7 709 970
<i>Bioetanol</i>	4 647	4 028	11 188	1 673	24 054 982	5 960 543	8 775 071

Tabell 8 Systemmasse, -volum, investeringskostnader, drivstoffutgifter, og totale årlige utgifter med forventet teknologiutvikling frem mot 2025



Figur 10 Sum årlige utgifter for brenselcellesystem på hurtiggående passasjerbåt på ruten Tromsø-Finnes-Harstad

Resultatene vist i

	Masse (kg)	Spesifikk energi (Wh/kg)	Volum (l)	Energitetthet (Wh/l)	Investeringskost (NOK/år)	Årlige drivstoffutgifter (NOK/år)	Årlige utgifter drivstoff, investering (10 år), vedlikehold (NOK/år)
GH2	30 620	408	87 703	142	41 605 333	19 480 456	24 238 002
LH2	12 317	1 520	38 888	481	44 471 588	25 324 593	30 397 427
Metanol	10 476	1 787	22 971	815	94 796 200	4 634 805	15 243 347
Biometanol	10 476	1 787	22 971	815	94 796 200	9 090 723	19 699 265
Bioetanol	10 476	1 787	22 971	815	94 726 570	7 346 983	17 947 865

Tabell 6

	Masse (kg)	Spesifikk energi (Wh/kg)	Volum (l)	Energitetthet (Wh/l)	Investeringskost (NOK/år)	Årlige drivstoffutgifter (NOK/år)	Årlige utgifter drivstoff, investering (10 år), vedlikehold (NOK/år)
GH2	17 282	722	64 626	193	19 705 600	11 868 663	14 212 247
LH2	7 728	2 422	20 156	929	21 352 558	15 429 261	17 954 011
Metanol	6 809	2 749	14 930	1 254	47 765 906	3 821 686	9 251 904
Biometanol	6 809	2 749	14 930	1 254	47 765 906	6 746 282	12 176 499
Bioetanol	6 809	2 749	14 930	1 254	47 721 985	6 394 604	11 819 990

Tabell 7

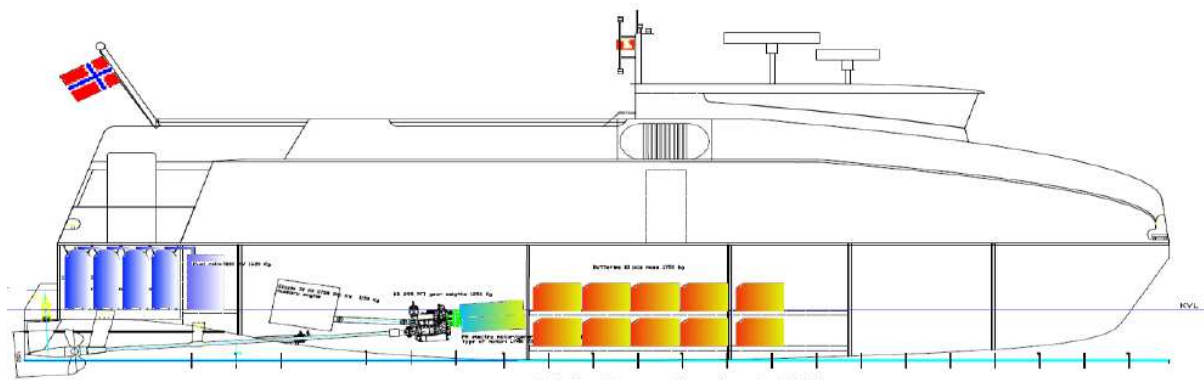
	Masse (kg)	Spesifikk energi (Wh/kg)	Volum (l)	Energitetthet (Wh/l)	Investeringskost (NOK/år)	Årlige drivstoffutgifter (NOK/år)	Årlige utgifter drivstoff, investering (10 år), vedlikehold (NOK/år)
GH2	17 282	722	64 626	193	19 705 600	11 868 663	14 212 247
LH2	7 728	2 422	20 156	929	21 352 558	15 429 261	17 954 011
Metanol	6 809	2 749	14 930	1 254	47 765 906	3 821 686	9 251 904
Biometanol	6 809	2 749	14 930	1 254	47 765 906	6 746 282	12 176 499
Bioetanol	6 809	2 749	14 930	1 254	47 721 985	6 394 604	11 819 990

<i>GH2</i>	10 646	1 172	55 988	223	10 069 333	7 902 162	9 178 268
<i>LH2</i>	5 977	3 132	17 139	1 092	11 250 836	10 272 810	11 678 882
<i>Metanol</i>	4 647	4 028	11 188	1 673	24 095 921	3 562 273	6 381 304
<i>Biometanol</i>	4 647	4 028	11 188	1 673	24 095 921	4 890 938	7 709 970
<i>Bioetanol</i>	4 647	4 028	11 188	1 673	24 054 982	5 960 543	8 775 071

Tabell 8

og Figur 10 fremhever viktigheten av å drive frem teknologiutvikling/markedsutvikling i årene som kommer. Gitt forventet utvikling vil hydrogendrevne brenselceller kunne være fullt ut konkurransedyktig innen få år. 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 hydrogendrevet brenselcellesystem sammenlignet med konvensjonelt system. Beregningene viser også at utgifter til drivstoff utgjør over 80% av totale årlige utgifter for brenselcellesystemet, ved bruk av hydrogen produsert ved elektrolyse. For (bio)metanol/etanol utgjør det 30 - 46% i dag og 56 - 68% i 2025. Brenselcellemoduler utgjør i dag om lag 90% av investeringskostnader i system med komprimert hydrogen (84% for flytende hydrogen). Andelen reduseres til om lag 83% (74% for LH₂) i 2025. For (HT)PEM med reformer og metanol/etanol som drivstoff utgjør kostnader til brenselcellemodul med reformer over 95% av systemets investeringskostnader.

For systemvekt og -volum er det tydelig at lagring av komprimert hydrogen gir økte utfordringer til design sammenlignet med konvensjonell teknologi og flytende hydrogen/(m)etanol. Samtidig har tidligere studier konkludert med at det vil være mulig å designe en hurtigbåt med hydrogen som drivstoff^{48,49}. Det må også påpekes at ruten Tromsø-Finnes-Harstad er relativt krevende med tanke på kraft- og energibehov, og at andre ruter vil være bedre egnet for hydrogendrift.



Figur 11 Konseptskisse hydrogensystem på hurtigbåt Bergen - Rosendal fra Transnovaprojekt Hydrogen som drivstoff på skip – Fra fornybar energi til utslippsfri fremdrift, 2014

⁴⁸ Hydrogen som drivstoff på skip – Fra fornybar energi til utslippsfri fremdrift, Sluttrapport Transnovaprojekt 2014028990, CMR Prototech, NCE Maritime CleanTech m. fl.

⁴⁹ SF BREEZE, Sandia National Laboratories, energy.sandia.gov/transportation-energy/hydrogen/market-transformation/maritime-fuel-cells/sf-breeze/



Figur 12 Hurtigbåt med flytende hydrogen. Fra prosjekt San Francisco Bay Renewable Energy Electric vessel with Zero Emissions (SF-BREEZE)⁴⁹

Kommersialiseringsløp

Ettersom hurtigbåter har høyt energiforbruk, og siden lav vekt og volum er viktig for implementerbarhet, vil det på mange hurtigbåtsrekninger være lite hensiktsmessig med ren batteridrift. Hydrogen og brenselceller gjenstår derfor som en teknologi som muliggjør nullutslipp også for slike typer fartøy. Biodrivstoff er et annet alternativ som gir vesentlig reduksjon av globale utslipp (gitt at energibruk til transport m.m. er begrenset), men som fremdeles bidrar til lokale utslipp. Brenselceller med bruk av biometanol/-etanol som drivstoff er således en teknologi med høy virkningsgrad, og som fører til vesentlig reduserte utslipp sammenlignet med konvensjonell dieseldrift.

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, Wärtsila, Eidsvik 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.

Beregninger utført i dette og andre studier viser at brenselcellesystemer vil kunne være konkurransedyktige med konvensjonelle systemer, særlig dersom utvikling av infrastruktur for drivstoff (hydrogen) fører til reduserte priser sammenlignet med det som er tilgjengelig i dag. Samtidig er det i dag utfordringer som må løses for å kunne kommersialisere maritime brenselceller og hydrogen for bruk i hurtigbåter og andre fartøy (Tabell 9).

Utviklingsbehov	Beskrivelse
Teknisk modenhet - tilpasning av brenselcelleteknologi til marint miljø (høy luftfuktighet, saltinnholdig luft, vibrasjoner, mekanisk sjokk).	I stor grad knyttet til tilpasning av delsystemer (luftfiltre osv.). Demonstrasjonsprosjekter har vist at det teknisk er fullt mulig å operere fartøy på hydrogen og brenselceller. Samtidig vil det være behov for å utvikle (standardiserte løsninger) tilpasset maritimt miljø.
Utvikling av infrastruktur	Pris på hydrogen er i dag kanskje den største barrieren mot å ta i bruk hydrogen som drivstoff. Det vil derfor være avgjørende med utvikling av infrastruktur (storskala hydrogenproduksjon) som vil kunne levere hydrogen til konkurransedyktige priser. Gode, standardiserte løsninger for fylling av hydrogen i fartøy må utvikles. Bruk av metanol/etanol vil lettere bli kunne tatt i bruk med bruk av eksisterende infrastruktur.
Pris på brenselceller	Brenselcellemoduler har i dag en høy andel av investeringskostnadene til et brenselcellebasert fremdriftssystem. Økt konkurranse og økte produksjonsvolumer vil på sikt føre til redusere priser på (marine) brenselceller.
Verifikasjon av sikkerhet og utvikling av regelverk	For å kunne ta i bruk hydrogen og brenselceller i maritim operasjon vil det være krav om dokumentasjon av at risikonivå er likt eller forbedret sammenlignet med dagens teknologi. Da det ikke foreligger regelverk som kan benyttes direkte til godkjenning, vil det bli påkrevd risikoanalyser og testing av systemer uten passasjerer, noe som vil medføre økte kostnader sammenlignet med konvensjonell teknologi. Det vil derfor være behov for å opparbeide erfaring som grunnlag for utvikling av regelverk og standarder for bruk av hydrogen og brenselceller i skip.

Tabell 9 Utviklingsbehov for maritime brenselcellesystemer

For å møte utfordringene listet i Tabell 9 vil det være behov for fullskala utviklings- og demonstrasjonsprosjekter som vil bidra til teknologiutvikling og samtidig gi erfaring til risikohåndtering og utvikling av regelverk. Samtidig vil det være avgjørende å legge til rette for utvikling av infrastruktur for bærekraftige drivstoff.

Det eksisterer i dag gode støtteordninger til ekstrainvesteringer for å ta i bruk miljøteknologi gjennom Enova og NO_x-fondet. Samtidig vil det for utviklingsprosjekter/demonstrasjonsprosjekter sannsynligvis være behov for støtteordninger for bruk av hydrogen som drivstoff, inntil storskala hydrogenproduksjon til konkurransedyktige priser er bygget ut, eller ved at kostnad for bruk av konvensjonelt drivstoff øker (f.eks. ved innføring av betydelig karbonprising eller regelverk med tydelige krav til reduserte utslipp)⁵⁰.

Grunnet hurtigbåters høye kraft- og energibehov, samt behov for kompakte, lette systemer, vil det sannsynligvis være mest fornuftig at de første utviklings-/demonstrasjonsprosjektene knyttet til hydrogen benytter «enklere» fartøy som f.eks. ferjer, fiskefartøy, andre nyttefartøy eller lignende. Derimot vil hurtigbåter være attraktivt for utvikling av brenselcellesystemer drevet av (bio)metanol/etanol.

Oppsummering og videre anbefalinger

Hurtiggående passasjerbåter kjennetegnes ved høyt energiforbruk, samtidig som lav vekt er avgjørende for mest mulig effektiv drift, noe som fører til at det på mange strekninger være lite hensiktsmessig med ren

⁵⁰ Nasjonale rammebetingelser og potensial for hydrogensatsingen i Norge, A. Tomasgard et. al., SINTEF-rapport 2016

batteridrift. Hydrogen og brenselceller står dermed igjen som en teknologi som muliggjør nullutslipp også for slike typer fartøy. Tidligere og pågående internasjonale demonstrasjonsprosjekter har vist at brenselceller er godt egnet for maritimt bruk, samtidig som utvikling knyttet til regelverk og risikohåndtering samt optimalisering av marine brenselceller kreves for å gå inn i kommersialiseringsfase. Gitt forventet utvikling vil hydrogendrevne brenselceller kunne være fullt ut konkurransedyktig innen få år. 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 hydrogendrevet brenselcellesystem sammenlignet med konvensjonelt system. Beregningene viser også at utgifter til drivstoff utgjør over 80% av totale årlige utgifter for hydrogendrevne brenselcellesystem, noe som viser viktigheten av å legge til rette for utvikling av god infrastruktur med storskala hydrogenproduksjon.

Biodrivstoff er et annet alternativ som, selv om lokale utslipp av klimagasser og partikler forekommer, gir vesentlig reduksjon av globale utslipp (gitt at energibruk til transport mm. er begrenset). Metanol/etanol som marint drivstoff har vesentlig lavere utslipp av SO_x, NO_x, partikler og CO₂ enn diesel, og blir i dag tatt i bruk i økende grad for å tilfredsstille strengere krav til utslippsreduksjon i havneområder. Brenselceller med bruk av biometanol/-etanol som drivstoff er således en teknologi med høy virkningsgrad, og vesentlig reduserte utslipp sammenlignet med konvensjonell dieseldrift. For (bio)metanol/etanol utgjør drivstoffkostnader 30 - 46% av totale årlige kostnader med bruk av dagens teknologi, og 56 - 68% i 2025.

I denne studien er beregninger utført for brenselcelledrift av hurtigbåt på ruten Tromsø-Finnes-Harstad. Komprimert hydrogengass, flytende hydrogen, metanol fra fossile kilder, biometanol og bioetanol, er blitt vurdert som ulike drivstoff. Av beregningene fremgår det at et brenselcellesystem med metanol (produsert fra fossile kilder) vil være det billigste alternativet, og at biometanol og bioetanol er rimeligere enn ren hydrogen (lagret som komprimert gass). Flytende hydrogen vil være det mest kostbare alternativet for brenselcelledrift vurdert i dette studiet, men som grunnet begrensninger i systemvekt og -volum likevel kan være aktuelt som nullutslippsløsning på energikrevende hurtigbåter på lengre sikt.

Brenselceller drevet av biometanol/etanol er, grunnet lave kostnader, lav systemvekt og -volum, samt god infrastruktur for drivstoff, derfor vurdert å være et godt alternativ for hurtigbåter.

For å bringe maritim brenselcelleteknologi til et kommersielt nivå, og dermed utvikle et fullverdig nullutslippsalternativ til dagens fossilbaserte energisystemer i fartøy, vurderes det som avgjørende å gjennomføre fullskala demoprojekt, samtidig som det legges til rette for utvikling av robust infrastruktur for drivstoff. 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 godkjenningssprosessen i fremtidige prosjekter

For hurtigbåter anbefales det å igangsette demonstrasjonsprosjekt/utviklingsprosjekt for brenselcelledrift med (bio)metanol/etanol som drivstoff i 2016/17. Det anbefales å demonstrere/utvikle maritime hydrogendrevne brenselcellesystemer først i «enklere» fartøy med lavere kraftbehov (som ferjer, fiskebåter, og andre nyttefartøy), med hurtigbåtprosjekt i neste fase.

APPENDIX D : KLIMAGASSBEREGNING (SVV/TRANSNOVA)

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

D.1 INNLEDNING

I anbudsutlysningen for miljø -og energieffektive ferjer⁵¹ 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/kWt – 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.

⁵¹ <http://www.regjeringen.no/nb/dep/sd/presesenter/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. SSB⁵² og transportetatene⁵³ anbefaler eller anvender norsk elektrisitetsmikser med virkningsberegninger og utslippsrapportering. Tilsvarende ser Klimakurs analyse bort ifra utslipp utenfor Norge og heller ikke Framtidens byer allokerer nødvendigvis utslipp til produksjon av elektrisitet eller bioenergi⁵⁴.

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 framtidsscenarioer 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 beregnes⁵⁵. *Towards a Sustainable Nordic Energy System*⁵⁶ 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

⁵² SSB (2008) Energiforbruk og utslipp til luft fra innenlandsk transport, Rapporter 2008/49

⁵³ UTREDNINGSFASEN, NASJONAL TRANSPORTPLAN 2014-2023, Klimagassbudsjett

⁵⁴ SSB (2011) Byer og miljø. Indikatorer for miljøutviklingen i "Framtidens byer"

⁵⁵ Statsbygg/Civitas/Eivind Selvig 3.mars 2011: Utslippsfaktorer for elektrisitetsbruk. Hvordan er dette implementert i klimagassregnskap.no versjon 3

⁵⁶ 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, hvilket 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/oprinnelsessertifikat/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 marginalbetraktninger⁵⁷. 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.

⁵⁷ 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 prosentsetser 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. Klif⁵⁸ 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 avfallet⁵⁹.

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

⁵⁸ Klif (2011) Biogass fra sambehandling av husdyrgjødsel og våtorganisk avfall. Kostnader og reduksjon av klimagassutslipp gjennom verdikjeden. TA 2704

⁵⁹ 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 alternativerendelser 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 arealbruksendringer⁶⁰ 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 tilbyderen dokumenterer at biodieselen i bruk tilfredstiller 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 diesel⁶¹, 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)⁶², noe som tilsvarer en utslippsreduksjon på 65%

⁶⁰ 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.

⁶¹ 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+MirqcQ2JMFAoAAABakUwg&bcsi_scan_filename=LinkClick.aspx

sammenlignet med diesel. Scenarieanalysen⁶³ 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 Ecoinvent⁶⁴ 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 Ecoinvents LCA-anslag.
- I en situasjon der valget har stått mellom bruk av nordisk elektrisitetsmiksberegning og tilnærminger med lavere klimagassutslipp virker det fornuftig å unngå de høyeste anslagene for det valgte marked.

Anslagene for Nordisk elektrisitetsmiksberegning 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 tilbud 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.

⁶² Miljøvurdering av el. Marginal og medel. Underlagsrapport Statens Energimyndighet

⁶³ Nordic Energy Perspectives 2010. Towards a Sustainable Nordic Energy System

⁶⁴ <http://www.ecoinvent.ch/>