

På Brint over Fjorden



Rapport

Et forstudie omhandlende muligheden for retrofit-installation af brint-brændselsceller til eksisterende indenlands færger

Projektet er støttet af:



Projektpartner:



Fra vind til vand



På Brint over Fjorden

Indholdsfortegnelse

Deltagerliste i alfabetisk orden.....	2
Konklusion	3
Introduktion.....	4
Deltagende færger.....	5
Energikortlægning	7
Teknologien – retrofit, design og godkendelser.....	9
Regelkrav – Klasse og Søfartsstyrelsen.....	17
Displacement og letvægt.	18
Indretning af rum under dæk	18
Varme & ventilationssystem	19
Ombygninger af stål	20
Elektrisk installation	21
Brandslukning og detektering	23
Udluftning fra områder med brint.....	23
Klasse krav	24
Teknologien - brændselsceller.....	25
Sikkerhed	27
Brint:	28
IMO 1455	30
Brintleverance	30
Status på brint og beskæftigelse	38
Vækst og beskæftigelse inden for grøn omstilling	41
Beregninger (Feggesund Færgen)	43
Bilagsoversigt:.....	44

Deltagerliste i alfabetisk orden

- **Ballard Power Systems Europe** – Producent og leverandør af brændselsceller til marine og transport
- **Dansk Energirådgivning** – Energirådgivning og optimering indenfor marine området samt landanlæg
- **Danske Maritime** – Brancheorganisation for danske leverandører af maritimt udstyr og skibe.
- **Everfuel** – Leverandør af brint og bunkeranlæg
- **Green Hub Denmark** – Erhvervs- og innovationsfremmeklynge
- **Morsø Kommune** – Driver færgeservice på Mors-Thy Færgefart
- **OSK- Shiptech** – Maritimt konsulenthus
- **Skive Kommune** – Driver færgeservice på Fursund Færgeri
- **Søfartsstyrelsen** – Dansk Maritim Styrelse & myndighed for området

På Brint over Fjorden

Konklusion

Rapporten viser, at det er muligt med dagens tilgængelige teknologi at retrofytte danske indenrigsfærger til ægte CO₂- og emissionsfri sejlads, hvilket for nogle kommuner giver en CO₂ reduktion på op til 25 % af deres totale CO₂- og emissionsudledning.

El og brint er et ægte emissionsfrit brændstof, når det laves af grøn strøm fra f.eks. vindmøller. Brint er en dyrere løsning her og nu, men den fremtidige udgift til brint forventes at blive reduceret de kommende år ifm. større efterspørgsel og flere leverandører på markedet. De kommende udbygninger af vindmøllekapaciteten vil give et ekstra boost til brintproduktionen, da der må forventes overkapacitet på elnettet, som kan udnyttes. Brint er en god energibærer, der kan lagres næsten tabsfrit – enten flydende (nedkølet) eller i tanke (tryk) – og energien kan udnyttes, når der er behov.

Mange af de danske indenrigsfærger vil med fordel kunne retrofittes eller udskiftes med en rent elektrisk fremdrivningsteknologi, men her er manglende udbygning af de lokale elforsyningsnet en faktor, der vil sætte begrænsninger for effektiv ladning af for eksempel en batterifærge.

Overfarter med høj intensitet og kort havnetid vil også være udfordret, da de vil have brug for meget kraftige og dyre ladeanlæg for at kunne opretholde driften, hvorfor dette ikke vil være en økonomisk rentabel løsning. Her er brint-brændselsceller en oplagt mulighed, når der skal findes en CO₂- og emissionsfri fremdrivning.

Danske virksomheder står klar med viden, teknologi og arbejdskapacitet både til retrofit- og nybygningsprojekter inden for elektriske systemer, brintleverancer, fyldeanlæg, batteri og brændselsceller. I projektet blev det undersøgt, hvorvidt det lovgivningsmæssigt er muligt at benytte brint til maritim transport, hvilket det kan konkluderes at det vil det være. Lovgivningen er dog endnu ikke er på plads, hvilket afhænger af, at de første projekter gennemføres.

Den økonomiske rentabilitet ved brint-brændselsceller ligger indenfor rækkevidde. Dog vil dagens lave oliepriser være medvirkende til at begrænse konverteringerne af færgerne, medmindre der træffes politisk beslutning om øget brug af CO₂- og emissionsfri færgetransport.

Der er indenfor nogle områder i projektet benyttet overslag for udgifterne, da ikke alle teknologier er tilgængelige i marinegodkendte versioner. Dette vil ved gennemførelse kunne opnås, hvilket muligvis vil kunne betyde en merudgift. Projektpartnerne har dog forsøgt at tage bedst muligt højde for dette.

Retrofit "pakken" består af:

<p>2 stk. Ballard FCwave™ brændselsceller a 200 kW, 3 stk. Corvus batteripakker a 80 kW, brint-lagertanke 150 kg, 2 stk. Hundested hybridgear, Danfoss "el-pakke" med styresystem, DC/AC inverter, eltavler mm., OSK-Shiptech - tegninger og godkendelser, ombygning på værft, stålarbejde, rør- og elarbejde m.v. <i>Retrofit pris ca. 20 mio. DKK – årlig CO₂ fortrængning 415 ton/år - forøgelse af brændstofomkostningerne er ca. 80%</i></p>
--

På Brint over Fjorden

Introduktion

Projektets formål er at afdække de tekniske, lovgivningsmæssige og økonomiske udfordringer, der er ved konvertering af eksisterende småfærger til emissionsfri, brintdrevne færger med udgangspunkt i eksisterende teknologi og omkostninger pr. jan. 2021.

Projektet er teknologisk fokuseret på en hybridløsning med brændselscelle og batterielektrisk energiforsyning til ø-, og genvejsfærger, fortrinsvis med regionalt produceret brint. Rapporten er beregnet til at kunne fungere som et beslutnings- og støtteværktøj for kommunale og private færageselskaber, når der skal træffes afgørelse vedrørende ombygning af færgerne samt indførelse af brug af alternative drivmidler til fremdrift.

Projektet er støttet af Den Danske Maritime Fond

Baggrund

Der er pt. 31 faste indenrigsfærgeruter i Danmark, hvoraf der er ca. 12 næsten identisk opbyggede doubleender færger, som er sammenlignelige med de to færger i projektet. Konceptet vil således kunne overføres til de øvrige færger.

Perspektiverne for alternative "grønne" drivmidler til fremdrift af danske småfærger er meget lovende og et område, der har et stort erhvervmæssigt potentiale for danske maritime- og energirelaterede virksomheder i forbindelse med den grønne omstilling. Således er der fremragende muligheder for sektorkobling mellem det maritime område og energisektoren, hvor overskydende energi fra fluktuerende energikilder som sol og vind via Power-2-X-teknologier, også kaldet "elektrofuels", kan finde anvendelse i transportsektoren.

Anvendelsen af nye grønne drivmidler i den maritime sektor vil ydermere have den positive effekt, at færgerne skal tilpasses/ombygges til de nye teknologier, hvorfor der ligger en række arbejdsopgaver for den danske maritime industri i at få færgerne ombygget og klargjort til at kunne sejle på f.eks. brint og/eller el. De fleste indenrigsfærger i Danmark drives og finansieres af kommunerne, og derudover drives en række både større og mindre færgeruter af private selskaber.

Flere af disse ruter vil med fordel kunne omlægges til fuld elektrisk drift. Men der er en række ruter, hvor opladning af færgernes batterier vil besværliggøres af manglende lokal kapacitet på el-nette, hvilket leder til meget dyre nettilkoblingsløsninger for at kunne opnå en tilstrækkelig høj ladeeffekt.

For sådanne små-færger kommer brint, brændselsceller og batterier på banen som et muligt grønt alternativ. Dette projekt belyser hvilke muligheder, begrænsninger og perspektiver, der ligger i at omstille småfærger til emissionsfri drift på brint-elektriske fremdriftssystemer med brændselsceller.

På Brint over Fjorden

Deltagende færger

Projektet "På Brint Over Fjorden" omhandler de to færger M/F Feggesund og M/F Mjølner-Fur, og de muligheder der er for at forbedre overfarternes grønne profil og samtidige fremvise muliggørelse af brint-drevet indlandsfærger i Danmark.

Begge færger kan ved en retrofit ombygges, således at fremdrivningsmetoden ændres fra konventionel diesel-mekanisk fremdrivningsystem til et elektrisk fremdrivningsystem med primær forsyning fra brændselsceller supporteret af batterier.



Figur 1: M/F Mjølner Fur

Fursund Færgeri drives af Skive Kommune og er med 72 dobbeltture i døgnet den færgeoverfart i Danmark med flest overfarer. Overfarten tager 3 - 4 minutter og besejles af normalt af en færge døgnet rundt, men i spidslastperioder med begge af rederiets to færger.

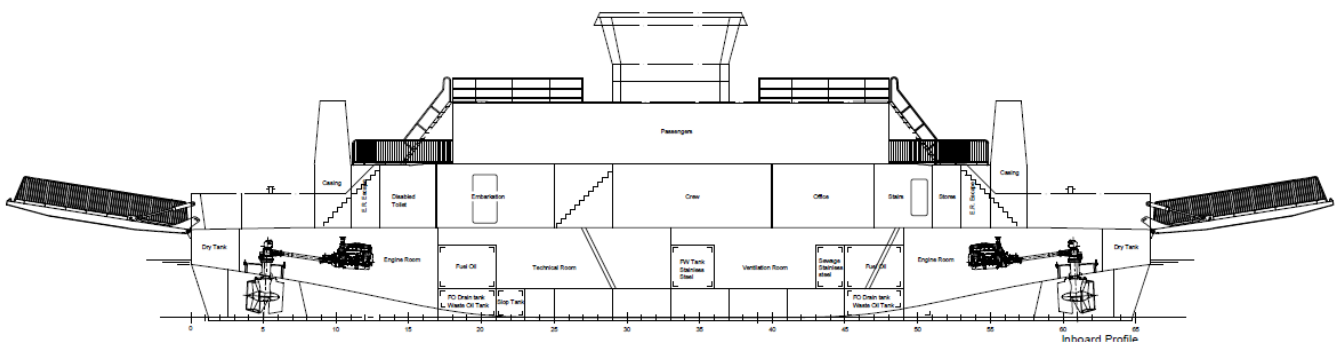
På Brint over Fjorden



Figur 2: M/F Feggesund

Mors-Thy Færgefart drives af Morsø Kommune og har ca. 20 overfarter i døgnet. Overfarten tager 5 - 7 minutter. Rederiet har færgen M/F Feggesund der besejler overfarten.

Fremdrivningssystemet og det elektriske system på de to færger er opbygget stort set identisk, og det er derfor efterfølgende i rapporten valgt at vise principperne på tegninger af M/F Feggesund.



Figur 3: General Arrangement - Feggesund færgen

På Brint over Fjorden

Energikortlægning

Dansk Energirådgivning A/S

Dansk Energirådgivning er en privat, uvildig rådgivningsvirksomhed og er en af de ledende energirådgivere i Danmark. Vi rådgiver virksomheder i at bruge energien optimalt ved at tilbyde helhedsorienteret og kvalitetssikret energirådgivning, som bidrager til optimale arbejdsprocesser, en bedre driftsøkonomi og en mere bæredygtig fremtid. Senest har vi i den tiltagende fokus på krav om reduktion af CO₂ og emissioner også arbejdet med at hjælpe virksomheder med grøn og cirkulær omstilling.

Vi har stor erfaring med energioptimering af fiskefartøjer og færger både som retrofit-projekter og nybygninger. I løbet af de sidste 6 år har vi gennemført over 200 projekter på fartøjer i den danske fiske- og færgeflåde, hvor vi har været involveret i udviklingen og dokumentationen af energibesparelser samt med ansøgninger om energisparetilskud og andre subsidier, samt deltaget i flere forsknings- og udviklingsprojekter – både som konsulenter, partner og projektholder.

I forbindelse med projektet har Dansk Energirådgivning gennemført energiscreeninger af de to færger, hvilket indbefatter kortlægning af det eksisterende energiforbrug. De to færger er stort set identiske, men ruterne og energiforbruget differentierer sig fra hinanden ved længde, overfartstid og driftsintensiteten.

Alternative brændstoffer

Der findes flere alternativer til det i dag mest benyttede brændstof, som er marinediesel med op til 0,1 % svovl, der kan være med til at reducere CO₂-udledning samt partikelemissioner. De mest gængse er GLT diesel (Gas to Liquid), hvor naturgas konverteres til et dieselprodukt. En anden er biodiesel, der bl.a. er lavet af restprodukter fra slagterier. Fælles for produkterne er udtalelsen fra producenterne om, at de er CO₂-og emissionsreducerende, og at der er mange forskellige meninger om produkterne. Efterfølgende deles erfaringerne fra et af de i projektet medvirkende rederier, som benytter biodiesel til en af deres to færger. Der er i projektet ikke foretaget røggasanalyser ombord på nogle af færgerne og generelt ikke taget stilling til effekten af de alternative brændstoffer.

Fursund Færgeri "M/F Mjølner"

Færgen "Mjølner" sejler på den mest intensive rute og er, som en del af Skive Kommunes ønske om at reducere deres CO₂-udledning, skiftet til at sejle på biodiesel. De eksisterende dieselmotorer kan relativt enkelt omstilles til drift med biodiesel. Dette er dog ikke helt uden udfordringer, da det f.eks. kræver opvarmning af brændstoftankene til ca. 20°C, da biodiesel ellers bliver for tyktflydende og ikke kan pumpes.

Carsten Nielsen er teknisk chef for Fursund færgeri og har her delt deres erfaringer vedr. biodiesel og GTL-diesel:

Kort om vores erfaring med biodiesel fra DAKA

For at starte på den positive side, hedder det, at DAKA's biodiesel er CO₂-neutralt. Det er et regnestykke langt ud over mine evner, så det skal jeg undlade at forholde mig til, men det er argumentet for, at Mjølner sejler på det. Når det er sagt, synes jeg ikke, at der er så meget godt at sige om DAKA's diesel til en færge som vores. Det er der en række grunde til...

For det første er der prisen. Vi har gennem årene givet mellem 6,25 og 6,50 kr. pr liter. Dertil kommer ca. 4.500 kr. pr læs for at få det leveret. I skrivende stund koster GTL 3,50 kr. pr liter, og der er levering inkluderet i prisen. Udover det, er brændværdien i biodiesel ca. 15-16 % lavere end i almindelig diesel.

På Brint over Fjorden

Biodiesel fra DAKA skal samtidig have en temperatur på mindst 13 grader for at være flydende. Derfor har vi varmerør i tankene, og holder en tanktemperatur på 21-22 gr. Opvarmningen sker ved hjælp af dels spildvarme fra motorerne og dels ved hjælp af et oliefyr på 110 kw. Der er elvarme på alle brændstofrør.

Vi har også en del problemer med røg og lugt. For nogle år siden fik vi lavet en partikeludledningsmåling. På henholdsvis almindelig diesel, GTL, og biodiesel. Biodiesel udleder mere end dobbelt så mange partikler som almindeligt diesel. Og næsten fem gange så mange partikler som GTL. Dette til trods for, at vi har sodvasker anlæg på Mjølner, mens målingerne for GTL og almindeligt diesel er lavet uden nogen form for rensning.

Vi skifter motorolie og filtre hyppigere end ellers. Efter at have fået foretaget nogle olieanalyser, har vi sat olieskifteintervallet på hovedmotorer og hjælpemotorer til 400 timer. I garantiperioden krævede motorleverandøren olieskift for hver 200 timer for at holde garantien ved biodiesel. Ved almindelig marinediesel og GTL har vi ingen problemer haft med 500 timers interval mellem olieskift.

Sidst, men ikke mindst, ser vi øget slitage på bl.a. brændstofsyste­met på hjælpemotorerne. Og vi skifter jævnligt fødepumper og fordelerpumper på dem. For fødepumpernes vedkommende er det ikke så meget pga. slitage, som fordi biodieselen opløser tætningerne i pumpen. Til gengæld er der intet at bemærke på hovedmotorerne i den sammenhæng.

Det sidste, jeg vil nævne, er vores CJC brændstoffiltre, hvor vi skifter indsatser omkring dobbelt så ofte som normalt.

Carsten Nielsen – Maskinmester, Fursund Færgeri

Energikortlægning

I forbindelse med projektet lavede Dansk Energirådgivning en energigennemgang af færgerne og kortlagde driftsprofilerne for færgerne, som herefter benyttes i projektet.

Færgen "Mjølner" (Fursund) er udstyret med Blueflow Energy Management system, som er et energiovervågnings-system fra DEIF, som løbende logger energiforbruget ombord, her både brændstofforbruget til hovedmotorerne, det elektriske forbrug ombord samt andre relevante oplysninger som fart, vindhastigheder mv., der er nødvendige for at

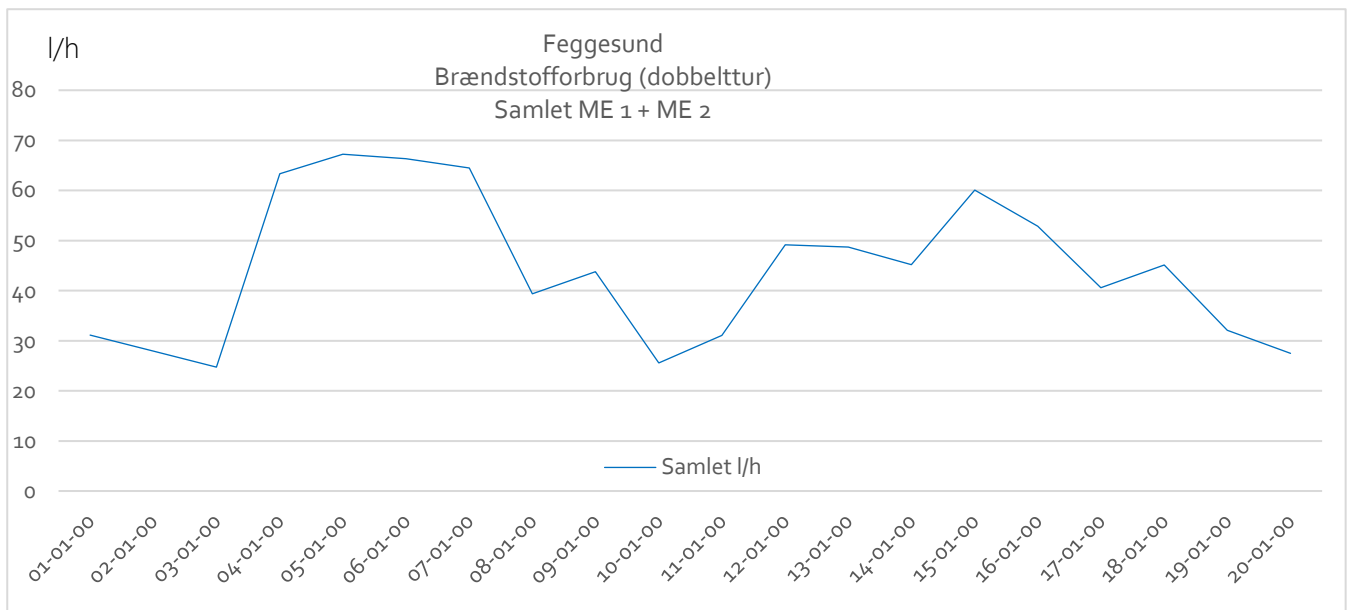


Figur 4: Udtræk fra Blueflow systemet – driftsprofil, dobbelttur "Mjølner"

På Brint over Fjorden

analysere energiforbruget på færgen. Blueflow systemet benyttes også til at dele erfaringer mellem de forskellige skibsførere, så den mest optimale drift af færgen opnås i dagligdagen. I projektet er der benyttet data til at udarbejde en driftsprofil på en dobbelttur, som sammen med det årlige forbrug benyttes til at udlægge den nødvendige effekt i hybridsystemet.

Driftsprofilen viser hovedmotorenes brændstofforbrug på en dobbelttur, i dette tilfælde i "jævn til frisk vind" som rederiet selv udlægger som værende "normalt" vejr. Der er i projektet benyttet data for flere perioder med varierende vind og strømforhold.



Figur 5: Driftsprofil "Feggesund"

For Thy – Mors færgen "Feggesund" blev energiforbruget ombord kortlagt af Dansk Energirådgivning vha. brændstofforlogger med målinger på de to hovedmotorer samt den elektriske effekt fra generatorerne. Feggesund har med en lidt længere rute en anden driftsprofil, og samtidig er overfartsintensiteten ikke så høj.

Teknologien – retrofit, design og godkendelser

OSK- Shiptech A/S

OSK-ShipTech har siden 1966 leveret maritime design- og ingeniørydelser til kunder i Danmark og hele verden.

Vi har foruden færger og passagerskibe specialiseret os i design af specialfartøjer såsom cargo og roro, crew transfers, transport- og installationsskibe til offshore vind, forsknings- og fiskeriinspektionsfartøjer og meget mere. Derudover tilbyder vi konsulentytelser inden for scrubber og ballastvand, EEDI og skrogoptimering, projektledelse og udbud, compliance m.m. for både ny- og ombygninger.

Som maritime konsulenter er det vores fornemmeste opgave at hjælpe vores kunder med at designe det optimale skib til formålet med det mindst mulige brændstofforbrug eller lavest mulige miljøbelastning.

OSK-ShipTech udgør sammen med søsterselskaberne OSK-Offshore og Steen Friis Design OSK Group, som er et af Skandinaviens største konsulent huse, der tilbyder full-line konsulentytelser inden for maritimt design og skibskoncepter på baggrund af en unik kombination af teknisk og kommerciel ekspertise.

På Brint over Fjorden

Introduktion

Projektet "På Brint Over Fjorden" omhandler de to færger M/F Feggesund og M/F Mjølner-Fur samt de muligheder, der er for at forbedre overfarternes grønne profil og samtidige fremvise muliggørelse af brint-drevet indlandsfærger i Danmark.

Begge færger skal ved en retrofitting ombygges, således at fremdrivningsmetoden ændres fra konventionel diesel-mekanisk rotorpropeller fremdriving til elektrisk fremdriving med primær forsyning fra brændselsceller, supporteret af batterier. Fremdrivningssystemet og det elektriske hotellast-system er på de to færger opbygget stort set identisk, og det er derfor valgt at vise principperne på tegninger af M/F Feggesund. Ombygningsbeskrivelsen omhandler de tekniske aspekter forbundet med en installation af brændselscelle og batterier på færgen, og de muligheder der er for at koble det nye system på skibets eksisterende konstruktion.

Konceptbeskrivelse

Ombygningsbeskrivelsen omhandler de tekniske aspekter forbundet med en installation af brændselscelle og batterier på færgen, og de muligheder der er for at koble det nye system på skibets eksisterende systemer. Det er tænkt, at beskrivelsen skal fremvise det påkrævede ingeniørarbejde nødvendigt for at kunne gennemføre ombygningen. Derfor er beskrivelsen opbygget efter relevante overskrifter fra en konventionel skibsbygnings-specifikation. På baggrund af dette er det også muligt at estimere en dokumentationsliste, som viser tegninger, beregninger og rapport, der skal udføres, for at projektet kan blive godkendt af classeselskabet og flagstaten.

Beskrivelse af ombygning

En ombygning af færgen omhandler følgende områder:

- Batteribank og tilhørende BMS (Battery Management System)
- Brændselsceller med styring
- Strømtavle (AC/DC)
- Gear med kobling
- Elmotor til fremdrivning
- Brintlager
- Ventiler for brintstyring
- Fyldestation
- Ventilation
- Varmegenvinding
- Stålarbejde (rum, sluser mm)
- Rørarbejde
- Kabelarbejde
- evt.

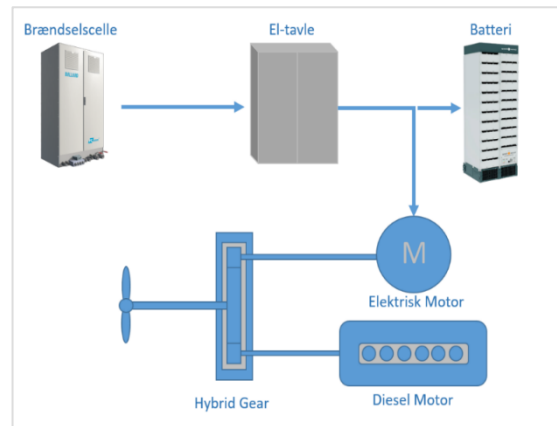
Brintflaskerne kan placeres flere steder ombord, og der er i rapporten lagt op til ti muligheder: Teknikrum under dæk eller på brodækket. I begge tilfælde kræves både strukturelle ændringer og forøget brandsikring, og der stilles under alle omstændigheder skærpede krav til sikkerheden – emner som er videre beskrevet i rapporten.

Energien fra brændselscellerne og batterierne leveres gennem el-tavler, videre til de elektriske fremdrivnings-motorer, som er placeret i henholdsvis maskinrum for og agter.

På Brint over Fjorden

De elektriske fremdrivningsmotorer er forbundet til en hybrid gearkasse med to adskilte kraftindtag. Gearkassen transmitterer kraften videre til en drivaksel, som slutteligt driver rorpropellerne. Det andet kraftindtag i gearkassen kobles på den eksisterende dieselmotor, der anvendes som sekundær fremdrivningsmetode i tilfælde af udfald af brændselscellerne.

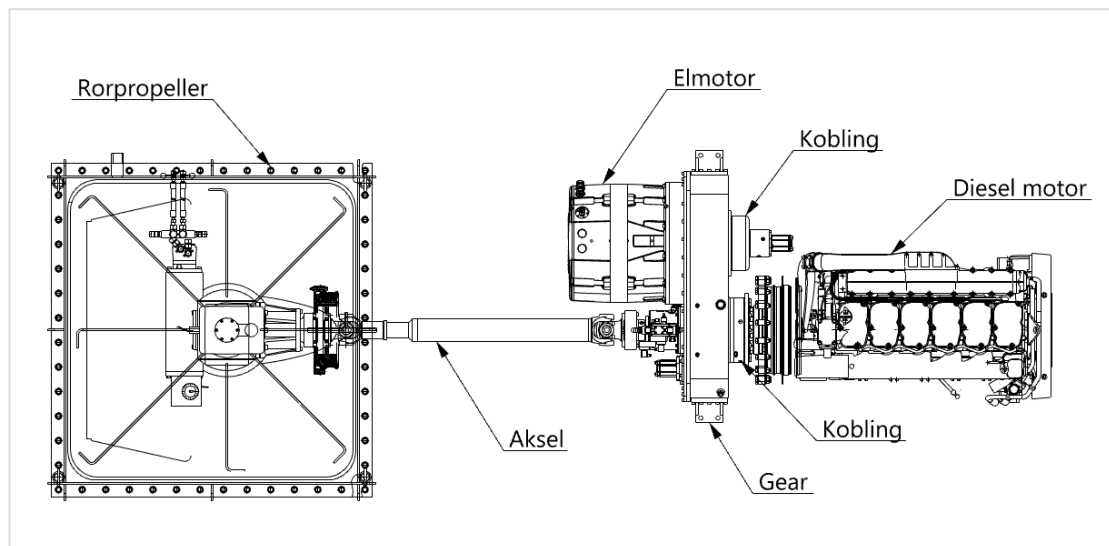
Skematisk kommer det nye system med brændselsceller, el-net og batterier til at se ud som på figur 6.



Figur 6 – Fremdrivnings konceptbeskrivelse

Retrofitting

Ombygningen af Feggesund færgen betyder, at skibet ændres fra konventionel diesel-mekaniske drivline til brint-batteri-elektrisk drivline, med diesel-backup. Den ombyggede drivline ses på figur 7.



Figur 7: Mekanisk drivline

Dieselmotor:

De eksisterende fremdrivningsmotorer er to Scania DI12 med hver en effekt på 368 kW ved 1800 rpm. Motoren kobles til et "dobbel in – single out" gear, og der monteres en hydraulisk kobling mellem de to dele.

Elmotor:

Den nye elektriske fremdrivningsmotor kobles også ind på gear med en hydraulisk kobling. Der skal i forbindelse med en detailprojektering udføres nye TVC (torsions-vibrations- beregninger) beregninger for det samlede anlæg for at sikre, at der ikke findes omdrejningsområder for motoren, som forårsager vibrationer. Al styring og alarmer kobles på færgens eksisterende system, eller der kan etableres et nyt separat system.

Gear med koblinger:

Gearet monteres med to hydrauliske flerplade-koblinger, som kobles direkte på gearet. De to koblinger skal være uafhængige af hinanden, og der skal være indbygget en manuel funktion, så det er muligt at frakoble hhv. dieselmotoren og elmotoren ved dødt skib. Der skal påbygges en/to hydraulikpumpe(r) direkte på gearet til at

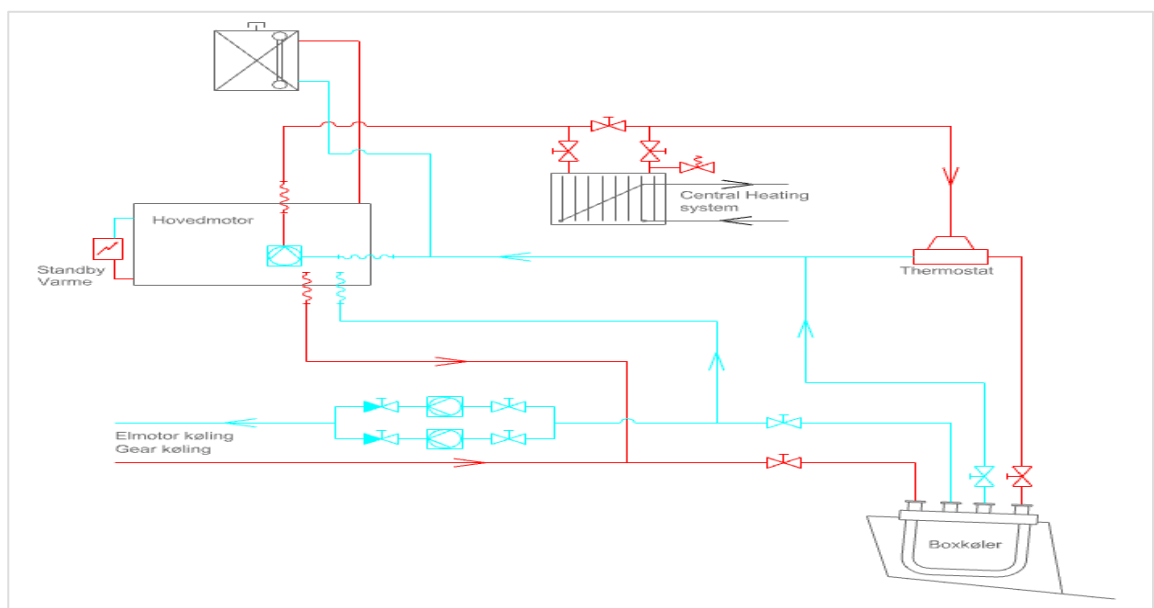
På Brint over Fjorden

forsynes koblingerne med det nødvendige tryk. Smøreliesystemet skal være monteret direkte på gearet og skal være uafhængig af andre systemer på færgen. Al styring og alarmer kobles på færgens eksisterende system, eller der etableres et nyt separat system.

Køling:

Både gearet og elmotoren skal køles med ferskvand. Feggesund færgen har som de fleste andre færges et separat kølevandssystem på hver motor, og den bedste måde at køle de nye komponenter er ved at lave en bypass på kølevandssystemet på de to hovedmotorer. Det kunne f.eks. være to frekvensstyrede Danfoss Magna pumper, der er meget simple at regulere ind. Disse pumper er ikke klassede, men hvis systemet udføres med 100 % redundans som vist på skitsen, godkendes denne løsning typisk. Det er kun få kW, der skal fjernes fra de nye komponenter, og der er altid en betydelige overkapacitet på bokskølerne.

Al styring og alarmer kobles på færgens eksisterende system, eller der etableres et nyt separat system. Se figur 8.



Figur 8: Køling af nye komponenter

Kardanaksel:

Den eksisterende kardanaksel, som forbinder rorpropelleren og gearet, skal muligvis kortes op, afhængig af hvordan fundamentet på hovedmotoren bygges op. Det er som altid vigtigt, at vinklerne i de to ender er ens – for at undgå uens slid.

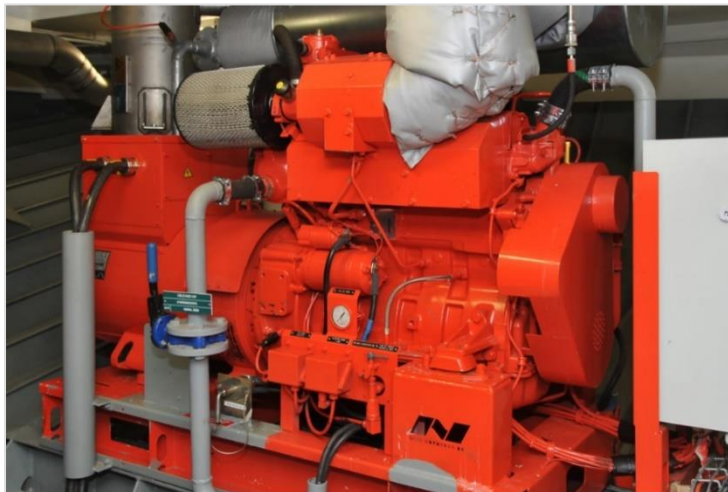
Rorpropelleren (Azimuth thruster):

Krøjefunktionen på rorpropelleren bliver typisk forsynet med olietryk fra hovedmotoren, men eftersom disse nu ikke altid kører, er det nødvendigt at ændre dette til elektriske hydrauliske pumper. Al styring og alarmer kobles på færgens eksisterende system, eller der etableres et nyt separat system.

Hotellast:

Det almindelige strømforbrug ved daglig drift kaldes hotellast. Hotellasten dækker over lys, ventilation, pumper, hydraulik mm. Færgen har to identiske generatoranlæg til at dække hotellasten, som er placeret i hvert deres maskinrum – se figur 9.

På Brint over Fjorden

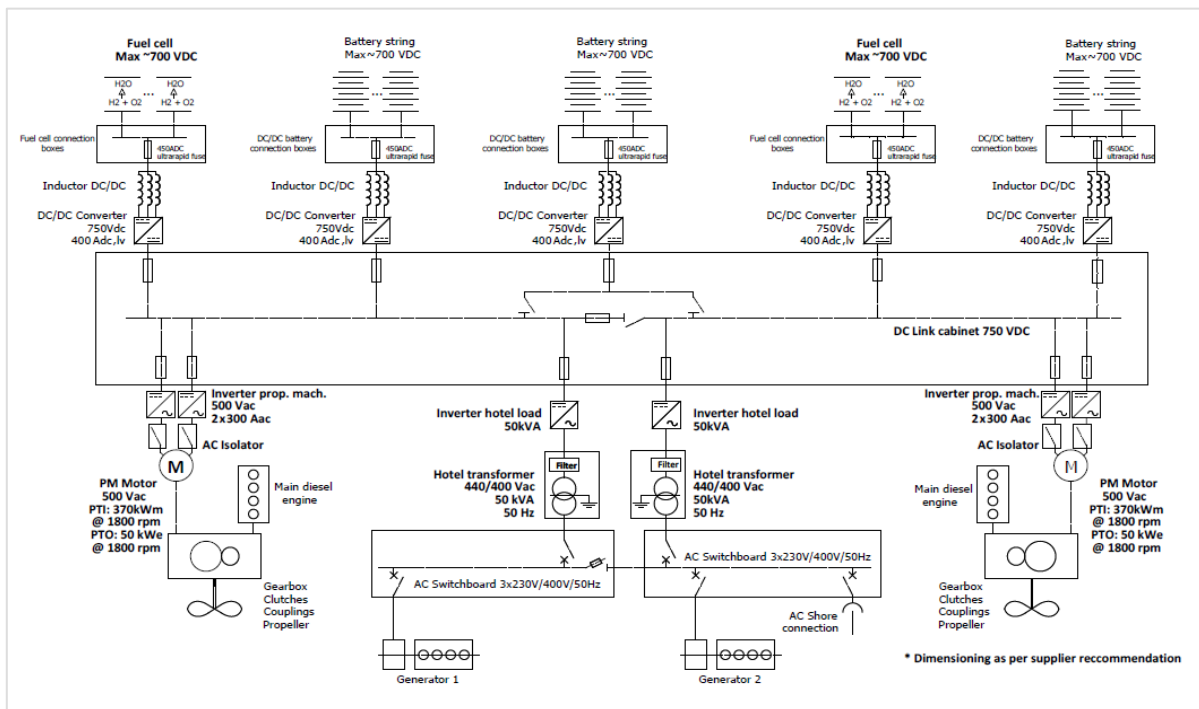


Figur 9: Generatoranlæg til elproduktion (hjælpemotor)

Ligesom de andre små danske indenrigsfærger, har Feggesund færger fritagelse for nødgenerator på den betingelse, at der er installeret to uafhængige generatore i to uafhængige rum under dæk. De to generatore forsyner hver deres hovedtavle, som er placeret i umiddelbar nærhed af generatorerne. Tavlerne er opbygget med 400V/230V felter, samt diverse transformere. De to generatore kører ikke parallelt, men altid en ad gangen. Der er indbygget en styring, således at hvis den ene generator stopper, så starter den anden op.

Ovenstående beskrivelse og funktion skal fortsat være opfyldt efter en ombygning til elektrisk fremdrift. Al styring og alarmer kobles på færgerens eksisterende system, eller der etableres et nyt separat system.

DC strømtavle for fremdriving og hotellast:



Figur 10: Strømtavle for fremdriving og hotellast (Single Line Diagram)

På Brint over Fjorden

Anlægget er opbygget som et 750V DC-system, med DC/DC-converter monteret mellem brændselsceller/batterier og DC-linket.

Strømtavlen er delt i to med en bryder, men eftersom vi har fuld redundans, kunne dette godt fjernes.

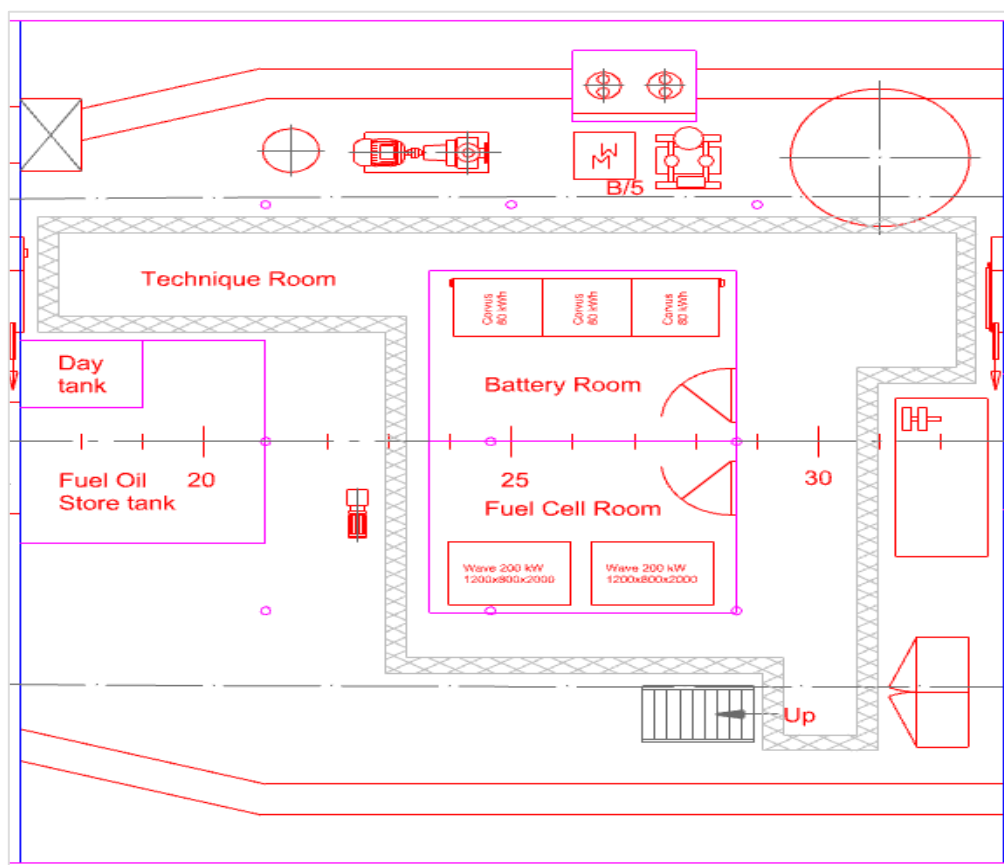
Der monteres DC/AC inverter mellem strømtavle/elmotorerne og strømtavle/AC-tavlen.

Ved sejlads på diesel er der desuden mulighed for op til 50 kW PTO tilbage på batterierne.

Batterirum og brændselscellerum:

De nationale regler omkring batterirum forskriver om rummet:

- Batterierne skal installeres særskilt i et rum, der opfylder kravene til maskinrum A (se figur 11).
 - Rummet skal A60 isoleres mod maskinrum mm.
 - Ventilation skal monteres og skal være uafhængig.
 - Der skal være køling af rummene.
 - Brandslukning skal monteres.
 - Gasdetektering skal monteres.
 - Der skal udarbejdes IMO 1455, hvilket kan betyde yderligere krav.



Figur 11: Batterirum & Fuelcell rum: (Se 200510.1009.03 General Arrangement)

Der findes ikke på nuværende tidspunkt nationale regler fra Søfartsstyrelsen vedr. krav til rum indeholdende brændselsceller, så vi må læne os op ad IGF Koden (*International Code of Safety for Ship Using Gases or Other Low-flashpoint Fuel*).

Ballard Power Systems er tæt på at færdiggøre typegodkendelse fra DNV-GL på deres brændselscelle. Deres design af brændselscellen er udført, så hele raket er godkendt som zone 1, og derfor skulle det ikke være påkrævet med en sluse ind i rummet.

På Brint over Fjorden

Placering af brinttanke:

Historisk har de gasdrevne fartøjer, der er bygget gennem tiderne, langt overvejende benyttet LNG (flydende naturgas) fremfor CNG (komprimeret naturgas). Det er pga. energitætheden, at det langt har været at foretrække LNG, og der er efterhånden en del leverandører, som kan levere hele pakken med fuld klasse.

Anderledes er det med brint, hvor udviklingen af udstyr til den maritime sektor stadig er i gang, og hvor kun få godkendelser er på plads.

Partnerne i projektet har derfor valgt at fokusere på allerede udviklet udstyr fra landtransportbranchen, hvor brint har fungeret som brændstof i mange år. Ved at vælge allerede udviklet udstyr med standarddimensioner, tryk osv., forventer vi, at installationens kompleksitet – og dermed også pris – kan reduceres til et acceptabelt niveau. For at begrænse installationen, har rederiet accepteret, at der kun laves lagertanke svarende til min. et døgn's sejlads. Det er i forvejen normal praksis, at der tankes ferskvand og tømmes kloak næsten dagligt, og en ny daglig rutine med tankning er en acceptabel ændring for besætningen.

Projektet "På Brint over Fjorden" omhandler eksisterende færger, og det betyder, at der skal findes plads til et antal af brinttanke ombord, uden at lave de helt store forandringer på færgen. Ved et nybygningsprojekt vil der være helt andre muligheder for at finde en optimal placering af brintlageret, ligesom kabler, rør, ventilation mm. alt andet lige vil være simple at integrere i færgen.

Der henvises til tegningerne i:

Bilag 2: 200510.1009.01 Brintområde A

Bilag 3: 200510.1009.02 Brintområde B

Disse tegninger viser forskellen på at placere tankene hhv. under og over dæk.

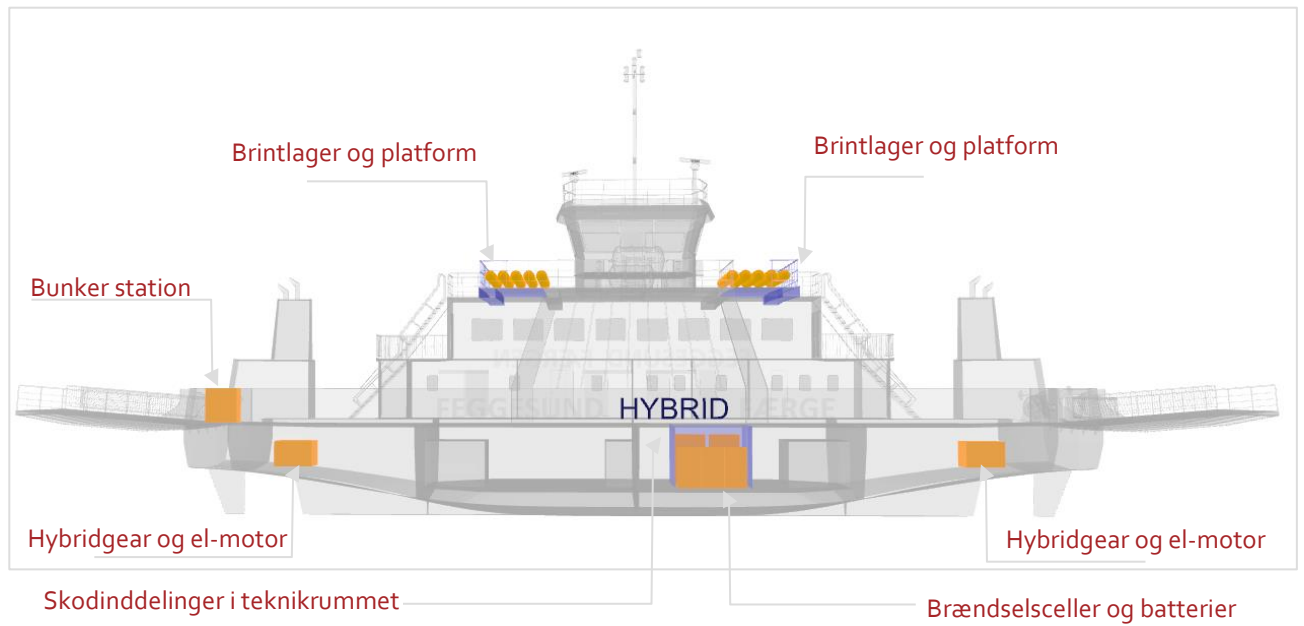
Løsningen med tankene under dæk giver krav om både Zone 0,1,2 ved tankene og desuden en kofferdam mod maskinrummet. Hele installationen kan godt placeres indenfor B/5 linjen, men løsningen vil betyde store strukturelle ændringer i området, foruden flytning af kloaktanken.

Løsningen med tankene på brodækket gør installationen af tankene noget enklere. Det er dog vigtigt, at brinttankene er indskoddet i et brintskab af stål. Både for at beskytte flaskerne mod brand på vogndækket, men også for at reducere de gas-zoner, der opstår omkring området.

Ventilerne for brintstyring, der skal styre forsyningen mellem brinttankene og brændselscellerne, skal også placeres i et Zone 2 område eller som på et LNG-skib være lukket inde i et godkendt og ventileret skab.

Senere i denne rapport er der en gennemgang af reglerne i gaskoden, hvor det også fremgår, at det er den bedste og mest sikre løsning at placere brintflaskerne på brodækket – se figur 12

På Brint over Fjorden



Figur 12 – Ombygningskoncept

På Brint over Fjorden

Regelkrav – Klasse og Søfartsstyrelsen

Skibet er oprindeligt bygget efter BV (Bureau Veritas) regler med følgende Klasse betegnelse:

1 ✘ Hull, ✘ Mach, Ro-Ro Passenger Ship, Coastal Area, ✘ AUT-UMS, Ice

Denne er siden trukket ud af klassen, hvilket ikke er usædvanligt for de små ø-færger.

Færgen er desuden bygget efter Søfartsstyrelsens Meddelelser D, Havområde D, og disse regler skal færgen fortsat opfylde. Søfartsstyrelsens (DMA) regler dækker ikke alle de funktioner, der findes på en færgе og derfor henviser DMA da også typisk til et anerkendt Klaseselskabs regler. Vi har i dette projekt valgt at bruge DNV-GL 's regelsæt, fordi de er meget langt fremme med implementering af Gas Koden.

Følgende er et kort resume af de regler (i bl.a. Gas Koden), som direkte har indflydelse på projektet:

1) DNV GL Rules for classification: Ships — DNVGL-RU-SHIP-Pt6 Ch2 Part 3 - Fuel Cell Installation – FC

Ovenstående regelsæt er udarbejdet for sikkert design og konstruktion af brændselscelle-installationer. En dybdegående gennemgang af regelsættet kan findes i afsnit 12

2) Klassenotation

Brændselscellerne skal benyttes til primær fremdrift, derfor skal skibet have tildelt klassenotationen: **FC Power**

3) DNV GL Rules for classification: Ships — DNVGL-RU-SHIP-Pt6 Ch2 Part 5 - GAS FUELLED SHIP INSTALLATIONS - GAS FUELLED LNG

Ovenstående regelsæt er udviklet med henblik på LNG-drevne skibe. Da der ikke er et direkte regelsæt til hydrogendrevne skibe, er dette regelsæt blevet anvendt. En dybdegående gennemgang af regelsættet kan findes i afsnit 12.

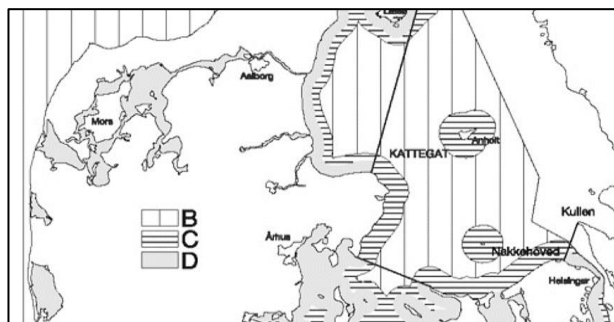
4) DNV GL Document code: DNVGL-CG-0156 – Conversions of ships

Ved ombygning af skibe stilles forskellige krav afhængigt af ombygningens omfang. Der skelnes mellem "alteration" og "conversion".

I dette tilfælde formodes det, at skibets betragtes som en **alteration**, da installation af brændselsceller ikke ændrer skibets type og fremdriftskraft.

5) Bekendtgørelse om Meddelelser fra Søfartsstyrelsen D, teknisk forskrift for skibes bygning og udstyr m.v., passagerskibe i national fart¹

Da skibet sejler i havområde D i danske farvande, skal skibet opfylde Søfartsstyrelsens meddelelse D.



Figur 13 - Havområde

På Brint over Fjorden

Displacement og letvægt

Displacement & letvægt:

Ved ombygning af skibe ændres der typisk på skibets displacement og letvægt. Ved en større ændring kan det forværre skibets stabilitet. SOLAS (safety of life at sea, et regelsæt som alle passagerskibe skal opfylde) stiller derfor krav til, at dette undersøges yderligere ved ombygning. Der kræves en opdatering af stabilitetsbogen, hvis følgende grænseværdier overskrides:

1. Den nye letvægt er vokset med mere end 2 % af den eksisterende letvægt
2. Skibets LCG er flyttet med en distance større end 1 % af LPP.

I forbindelse med ombygning af Feggesund færgeren skal der derfor udføres en detaljeret vægtberegning af den totale ombygning, hvor både nye og fjernede komponenter, rør og stål indgår. Dette udformes i en rapport, som indsendes til klassegodkendelse. Klaseselskabet evaluerer herefter på, om der skal udføres en opdatering af stabilitetsbogen, og dertil en letvægtsopgørelse og et krængningsforsøg.

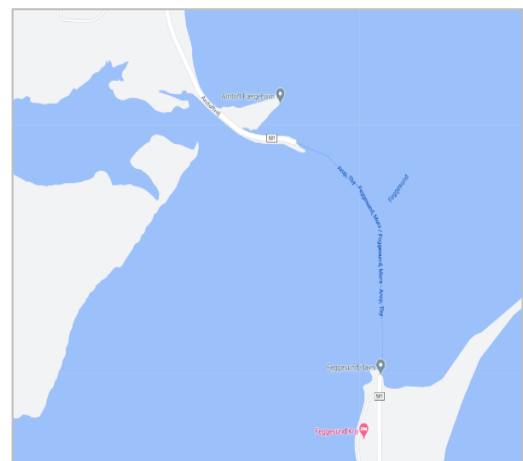
Kapacitetsplan:

Ombygningen indebærer et nyt brændstoflager til opbevaring af brint på gasform. Dette er en essentiel kapacitet for skibet og medfører derfor, at skibets eksisterende kapacitetsplan skal opdateres og fremsendes til godkendelse.

Diesel forbrug:

Skibets forbrug af diesel ændres betydeligt, da sejladsen efter ombygningen nu primært skal foregå på brint. De eksisterende hovedmotorer og generatorer skal kun køre, hvis der opstår tekniske fejl ombord, eller hvis det ikke er muligt at skaffe brint.

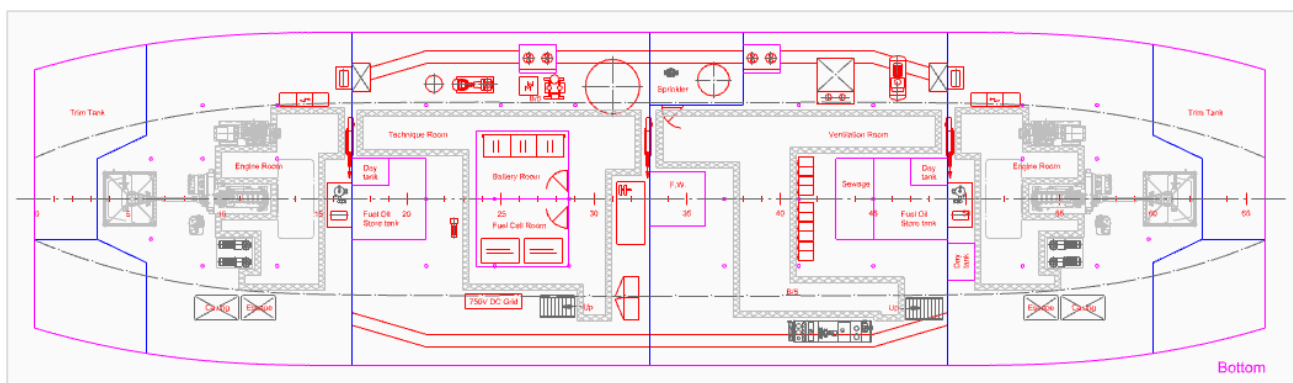
Det må antages, at færgeren fortsat skal have en fornuftig mængde diesel med, f.eks. svarende til 3-4 dages sejlads på ruten. Det betyder også, at dødvægten reduceres og kan konverteres til ekstra lasteevne.



Figur 14 - Overfartsrute

Indretning af rum under dæk

(Se 200510.1009.03 General Arrangement)



Figur 15: Indretning af rum under dæk

På Brint over Fjorden

Den nye installation foretages primært i henholdsvis teknikrummet og maskinrum for/agter. I henhold til gaskoden må en nedlukning af brændselscellesystemet ikke forårsage uacceptabelt tab af strøm og fremdrift på skibet. Dette løses primært ved, at den installerede batteribank har en kapacitet, så den kan forsyne skibet med en tilstrækkelig effekt, så færgen kan sejle sikkert i havn.

Sekundært bibeholdes de eksisterende generatorer, og hvis DC-strømtavlen mister spændingen, vil den ene generator automatisk starte på.

På fremdrivningssiden beholdes fremdrivningsmotorerne, som via hybridgearet stadig kan drive rorpropellerne. Derfor vil en sikkerheds nedlukning af brændselscellesystemet ikke sætte færgen ud af kraft.

Teknikrummet er på nuværende tidspunkt et relativt tomt område på skibet.

I henhold til klassekravet skal brændselscellerne og batterierne installeres indskodet udenfor maskinrum, og det vil derfor være et oplagt sted at placere både brændselscellerne og batterierne.

Derfor indbygges to små rum i teknikrummet, et til brændselscellerne og et til batterierne, så energikilderne er placeret hver for sig.

Det nye 750V DC strømtavle kan fint placeres på den ene side af den nye rum



Figur 16 - Teknik rum

De rør, der løber mellem brinttankene og brændselscellen, skal som udgangspunkt være dobbeltvæggede rør, for at de omkringliggende områder kan betragtes som "gas sikkert område". Dette medfører, at alle rør relateret til brintinstallation skal være dobbeltvæggede.

Varme & ventilationssystem

Både brændselscelle- og batterirummet har skærpet krav til ventilation, og en betydelig del af installationen vil være at etablere ventilationskanaler og udsugningsmaster.

Der skal udarbejdes en ny ventilationsberegning og et ventilationsarrangement, som opfylder kravene i forhold til farligt område zoner.

De nye ventilationskanaler som skal etableres er:

	Mekanisk ventilation	Ventilation ind	Ventilation ud
1	Batterirum	X	X
2	Brændselscelle (rum)	X	X
3	Dobbeltvægget rør mellem tanke og brændselscelle	X	X
4	Brintskab	X	X

De ovennævnte ventilationskanaler må ikke kombineres yderligere indbyrdes eller med eksisterende ventilationskanaler. Ventilationsmængde skal være tilstrækkelig til at kunne udsuge gasser til et niveau, som ikke er farligt i tilfælde af en lækage. Der skal etableres 2 x 100 % ventilatorer, som får strøm fra separate kredsløb. Slutteligt skal der etableres måleudstyr af ventilerede rum og af omkringliggende rum. Trykmåler skal sikre konstant overtryk af ventilerede rum. I tilfælde af undertryk skal der være automatisk nedlukning af brændstofs-system og

På Brint over Fjorden

brændselscellesystemet. Alle de mekaniske ventilatorer skal være godkendt som EX. Desuden skal der laves et fælles afluftningssystem af brintflaskerne til nødudblæsning (Pressure relief valve outlet)

Færgen har hidtil været opvarmet med overskudsvarme fra motorerne, som løbende blev akkumuleret i en varmetank og suppleret med el-opvarmning fra landstrøm om natten. Fremadrettet kommer overskudsvarmen fra brændselscellerne, og der kan i forbindelse med detail-projekteringen tilføjes varmepumper som supplement om natten.

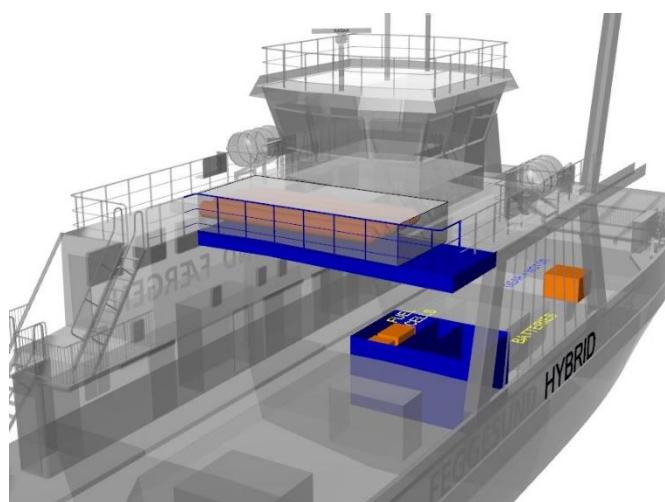
Ombygninger af stål

Brintskabe på brodækket

Som tidligere beskrevet betragtes det som nødvendigt at anbringe brintflaskerne i brintskabe på brodækket. Brintskabene skal bygges i stål og opfylde brandklasse A0, både med hensyn til opbygningen, men også mht. gennemføringer. For at få plads til flaskerne må dækket forlænges ca. 2.400 mm agter.

Det er et specifikt krav, at konstruktionen skal kunne modstå den signifikante nedkøling som sker, hvis flaskerne tømmes.

Brintskabene skal udføres som en gastæt stålkasse, med mekanisk ventilation ind/ud, tilslutning for nødudblæsning og en gennemføring til brinttilslutning.



Figur 17 – Brintflasker/skab på brodæk

Stålrør for mekanisk ventilation & naturlig ventilation.

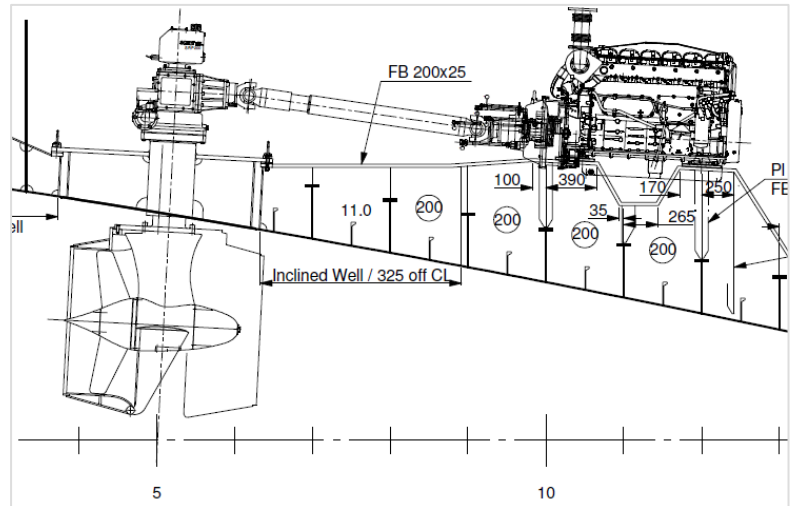
Som det er vist på tegningen 200510.1009.01 Brintområde A (bilag 2), skal der tilføjes en række ventilationskanaler og luftrør i forbindelsen med installationen. Det er nødvendigt at konstruere en relativ høj ventilations mast, for at kunne overholde sikkerhedskravet om afstanden for udluftning af hydrogenområder.

Alle rør skal overholde lastelinjekonventionen og de indstrømningsåbninger, der optræder i stabilitetsberegningerne. Det er alle emner, som skal undersøges nærmere i forbindelse med en detail projektering.

På Brint over Fjorden

Motorfundament:

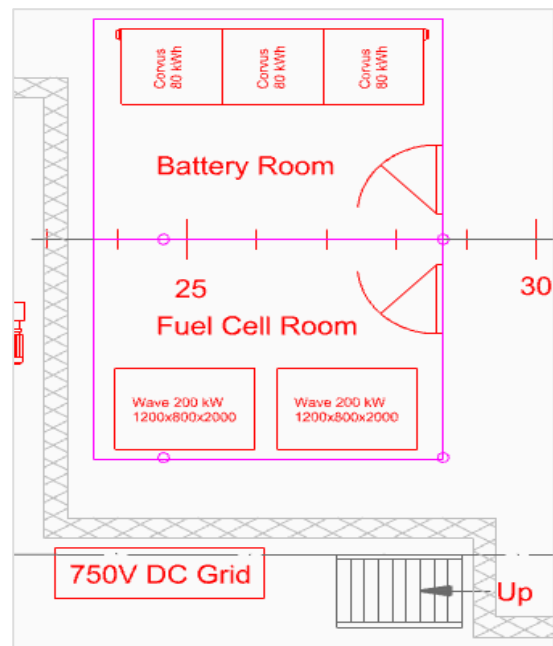
Det eksisterende motorfundament skal forandres svarende til det gear og den elmotor, der vælges. Dimensioner skal udføres iht. klassens krav, og det skal fortsat være muligt at servicere dieselmotoren.



Figur 18: Motorfundament

Teknikrum:

Som tidligere beskrevet er batterierne og brændselscellerne placeret i to små rum i teknikrummet under dæk. Rummene skal bygges i stål svarende til A0 og skal som minimum A60- brandisoleres mod vogndækket. Den endelige IMO1455 kan betyde, at der skal udføres yderligere brandisolering. Rummene bygges direkte ovenpå tanktoppen og helt op til vogndækket. Både rum og døre skal foruden brandkrav være gastætte. Dørene skal være selvlukkende med indikation på broen. Alle gennemføringer skal udføres med godkendte brand- & gastætte gennemføringer.



Figur 19: Teknik rum

Elektrisk installation

Som tidligere beskrevet ændres færgen fra en diesel-mekanisk løsning til en ren elektrisk færg med mulighed for diesel back-up. Den elektriske fremdrivning realiseres ved, at der installeres brændselsceller, som leverer en tilstrækkelig kapacitet til at drive fremdrivningsmotorerne og hotellasten.

Brændselscellerne leverer kontinuerligt energi til færgen, men fordi forbruget varierer, er der desuden indbygget en batteribank, som hhv. kan afgive og modtage den overskydende energimængde. Batteriernes funktion er peak-shaving (tager udsving i belastningen), men fordi batterierne har en stor kapacitet, kan færgen sejle i en periode på ren batteristrøm, uden hjælp fra brændselscellen.

På Brint over Fjorden

Følgende komponenter indgår i systemet: (Se 200510.0802.01 Single Line Diagram):

2501-2502	ECS (Editron Control System)	Power and Energy Management System and Propulsion Control System
2801	DC-link cabinet, AN, IP23	
3101-3102	Permanent magnet machine, liquid cooled, IP65	The propulsion motor does not have thrust bearing for propeller loads
3201-3204	Inverter for propulsion machine, liquid cooled, IP67	-
3501-3502	Box with local back-up control panel for propulsion system	-
3801-3804	AC isolator for propulsion inverter	-
5201-5202	Inverter for hotel transformer feed, liquid cooled, IP67	-
5301-5302	Hotel transformer with integrated LC-filter, AN, IP23	-
6201-6204	DC/DC converter for energy storage, liquid cooled, IP67	-
6401-6404	Inductor for DC/DC converter, liquid cooled, IP65	-
8901-8910	X1 connection cable for inverter/converter	-
JB-1-LC	I/O Junction box for single inverter, with local controls	-
JB-1	I/O Junction box for single inverter	-
JB-2	I/O Junction box for two inverters	-

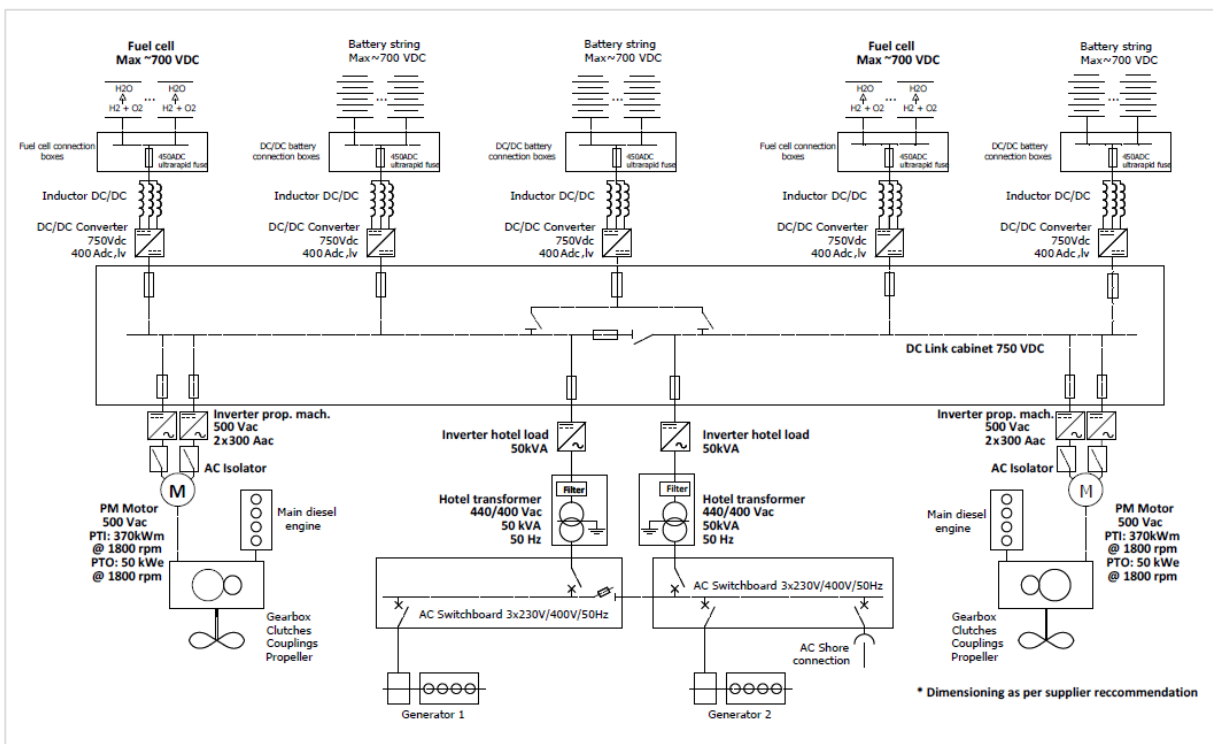
Den nye tavle til styring af energiforbruget ombord på færgen benævnes DC Link cabinet 750 VDC. På tegningen er tavlen delt i to med en bryder, men det kan laves på andre måder, afhængig af det endelige sæt-up.

Brændselscellerne er forbundet til tavlen via en "connection box", DC/DC inductor og en DC/DC-converter.

Batterierne er tilsvarende forbundet via en "connection box", DC/DC inductor og en DC/DC-converter.

Levering af energi til færgens hotellast sker via "Inverter hotel load" og "hotel transformer".

Energien til fremdrivningsmotorerne løber via "Inverter prop. mach.", "AC-isolator" og "PM motor".



Figur 14 – Single line Diagram

På Brint over Fjorden

Der skal i forbindelse med en detailprojektering udføres en opdateret E-last beregning for det samlede fartøj. Hvor Generator 1 & 2 er forbundet med den eksisterende hotellast-tavle, skal der tilføjes et modul, der giver en af generatorerne besked om at starte, hvis strømforsyningen fra DC Link forsvinder. Alle nye alarmer, som måtte være nødvendige, skal enten forbindes med skibets eksisterende alarmsystem eller monteres som nye separate alarmpaneler på broen.

Brandslukning og detektering

I forbindelse med dette projekt udføres første del af en IMO1455 i samarbejde med projektdeltagerne og DMA. En IMO 1455 er en risiko analyse, der udføres for at sikre, at sikkerheden ved et alternative fremdrivningssystem er tilsvarende et konventionelt system. I projektet laves ikke en opfølgning med DMA, så IMO1455 undersøgelsen er ikke endelig.

Den endelige IMO1455 kan afdække yderligere behov, men på nuværende tidspunkt forventes følgende ny brandslutning:

- Skum/sprinkler-dækning i batterirum
- Skum/sprinkler-dækning i brændselscellerum
- Drencher-dækning af brintskab.
- Brandmelder i batterirum
- Brandmelder i brændselscellerum

Betjening og detektering skal føres til styrepladsen på broen.

Alle ventilation og udstødningsåbninger skal udstyres med klassegodkendte brandspjæld.

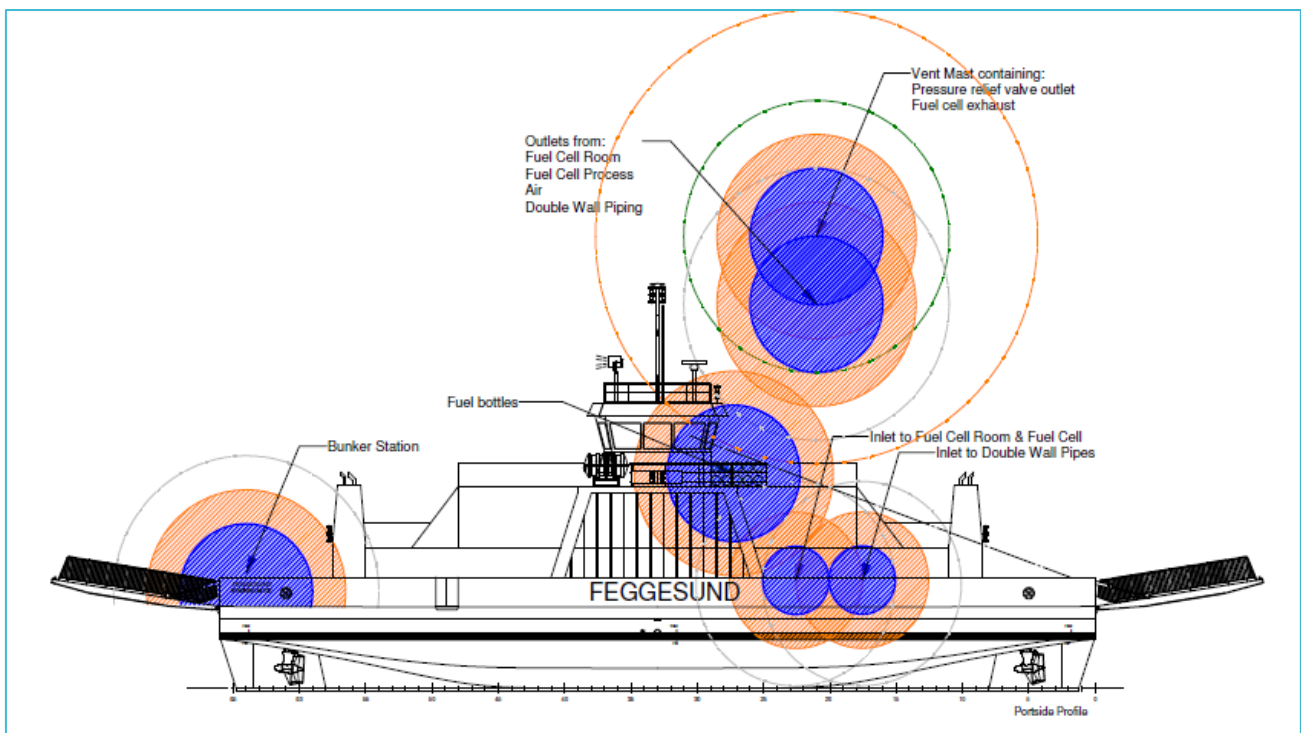
Brandspjæld skal lukke automatisk efter aktivering af brandslukningssystemet.

Udluftning fra områder med brint

I forbindelse med installation af brint, brændselsceller og batterier, skal der udføres en samlet tegning, der viser, hvor udluftning og ventilationen arrangeres ombord. Tegningen skal udføres iht. INF koden, og de berørte områder skal opdeles i zone 0, 1 eller 2, hvor der kræves ekstra sikkerhedsforanstaltninger.

I forbindelse med detailprojektering bliver det en opgave at lave en opmåling af alle luft- og ventilationsrør ombord, for at sikre at nye ventilationsrør ikke kommer til at sidde i umiddelbar nærhed af eksisterende rør, hvor det kan kompromittere sikkerheden – se 200510.1009.01 Brintområde A (bilag 2)

På Brint over Fjorden



Figur 15 – Udsnit af Brintområde A

De udluftninger, der skiller sig mest ud, er:

- Pressure relief valve outlet
- Fuel cell exhaust
- Fuel cell room outlet
- Double wall piping

Det skal bemærkes, at alle fire rør er placeret i stor højde over skroget, for at udblæsningen kommer langt nok væk fra det eksisterende udstyr. Ved en nybygning har man mulighed for at arrangere det bedre og lave det elektrisk udstyr EX godkendt fra starten.

Klasse krav

Ved ombygninger af skibe kræves en sagsbehandling fra DMA og klassen. Som tidligere beskrevet, er færgen ikke længere i klasse, men vi har i dette projekt valgt at bruge DNV-GL som udgangspunkt. DNV-GL-reglerne er kun udgivet på engelsk, og vi har kun gengivet på det originale sprog.

De klassekrav, som skal opfyldes, er angivet i den venstre kolonne, og den højre kolonne viser, hvordan designet vil tage højde for det enkelte krav.

The proposed installation with regards to the requirements for the notations FC (Power)

DNVGL-RU-SHIP Part6/Ch.2/Se.3

Vedhæftet som bilag 4

På Brint over Fjorden

Teknologien - brændselsceller

Ballard Power Systems Europe (BPSE) er en dansk virksomhed med hovedkontor i Hobro, firmaet er ejet af den canadiske brændselscelleproducent Ballard Power Systems inc.

Ballard Power Systems Europe fungerer som europæisk hovedsæde og arbejder med at udvikle og producere emissionsfrie (zero emission) energiløsninger baseret på brint og brændselsceller til gavn for den grønne omstilling i Danmark, Europa og hele verden. Ballard er således producent af LT-PEM-brændselscelleløsninger, dels målrettet den tunge transport særligt målrettet lastbiler, busser, toge og skibe, men også til stationære løsninger såsom backup og landstrømsløsninger til krydstogtskibe.

Ballard Power Systems Europe etablerede sig sidste år som "Maritime center of Excellence" hvilket betyder, at al udviklingen og produktion af det nye brændselscellemodul FCwave foregår i Hobro.

Brændselsceller:

Brintdrevne brændselsceller kan levere emissionsfri elektricitet til færger til både fremdrift og "hotel load" (elforbruget til alt andet end fremdrift). BPSE har udviklet et brændselscelleprodukt specifikt til maritime applikationer, som blev lanceret i 2020 under navnet FCwave™. Det er dette produkt, der danner udgangspunkt for beregningerne til færgen i dette projekt.

Brændselscelleproduktet er baseret på Ballards mangeårige erfaringer med LT-PEM-teknologi som er blevet demonstreret i en række transport applikationer – heriblandt, busser, lastbiler og toge. Brændselscelleproduktet er blevet udviklet i Ballard Europes "Maritime Center of Excellence".

De første FCwave™ moduler vil blive leveret til en række projekter i form af projektet "Flagships" hvor til dels en passagerfærge 600 kW i Stavanger Norge og en pram 400 kW til Lyon Frankrig vil demonstrere brugen af FC-Wave modulet.

FCwave™ er blevet testet og certificeret til brug i skibe. Systemet kan skaleres fra 200 kW til MW størrelse og kan derfor tilpasses til at kunne opfylde kravene for en lang række skibstyper lige fra færger og pramme til "hotel load" for krydstogtskibe.

FCwave™ indeholder en lang række funktioner:

- **Lave levetidsomkostninger**, er opnået gennem produktoptimering, udnyttelse af komponenter på tværs af produktplatforme og lave vedligeholdelseskrav.
- **Lang levetid**, modulet er baseret på Ballards FCgen®-LCS stak, som er designet til at levere en langsigtet ydeevne.

På Brint over Fjorden

- **Nem at integrere**, systemet er integreret i et kabinet, med nemt tilgængelige adgangsdøre og grænseflader fra fronten til service og vedligeholdelse.
- **Sikker drift**, systemet er designet i tæt samarbejde med den maritime industri til at modstå det krævende havmiljø og opfylde de strengeste sikkerhedsstandarder.
- **Fjerndiagnostik**, en direkte forbindelse til modulet giver kunden mulighed for at overvåge ydeevne eksternt og planlægge forebyggende vedligeholdelse.
- **State of the art**, den brændselscelle teknologi, der er inkluderet i FCwave™, bliver brugt af mere end 3.000 brændselscelle elektriske lastbiler og busser i Kina, Europa og Nordamerika.¹



PRODUCT SPECIFICATIONS

	FCwave™
Performance	
Rated power	200 kW
Minimum power	30 kW
Peak fuel Efficiency	56 %
Operating voltage	350 - 720 V DC
Rated current ¹	2 x 300 A 1 x 550
System cooling output	Max 65° C
Stack technology	
Heat management	Liquid cooled
H2 Pressure	3,5 - 5 Barg
Physical	
Dimensions (l x w x h) ²	1220 mm x 738 mm x 2200 mm
Weight (estimate) ³	875 kg
Environmental protection	IP44
Engine room (DNV GL CG-0339)	+0° C - +45° C
Minimum start-up temperature	0° C
Short-term storage temp	-40° C - +80° C
Reactants and Coolant	
Type	Gaseous hydrogen
Composition	As per SAE spec. J2719
Oxidant	Air
Composition	Particulate, Chemical and Salt filtered
Coolant ⁴	Water or 50/50 glycol
Safety Compliance	
Certifications	DNV-GL compliant
Enclosure	Hydrogen safe enclosure
Monitoring	
Control interface	Ethernet, Can
Emissions	
Exhaust	Zero-emission
<small>¹System output is 2 x 300 A (1 x 550A output still under development). ² Target size. ³ Includes: framed skid base, fuel cell stacks, plumbing and wiring, H2 enclosure, cooling system, air system, electrical panel, and miscellaneous (sensors, cable tray, etc.). ⁴ Customer coolant type.</small>	

Figur 16. Billede og produktspecifikation for FCwave™

¹ Product Data Sheet FCwave™ https://www.ballard.com/docs/default-source/spec-sheets/fcwavetm-specification-sheet.pdf?sfvrsn=6e44dd80_4

På Brint over Fjorden

Baseret på skibets driftsprofil og kravene formuleret af kunden, designs en hybrid power løsning for den optimale sammensætning af batterier og brændselsceller med henblik på at optimere investeringsomkostninger til ombygningen og driftsomkostninger til brændstof og elektricitet fra ladeanlæg.

Til denne færge anvendes en eller to FCwave moduler samt tre 80 kWh batterier, som tilsammen kan levere den nødvendige energi til færgen.

Dette danner udgangspunkt for dimensioneringen af brintlagertankene ombord på skibet, som forventes at blive tanket en gang i døgn. Denne driftsrutine kræver 160 kg hydrogen i døgn med den valgte hybridiseringsprofil. Af de gængse, godkendte og prisvenlige tankprodukter på markedet er valgt en løsning, der kan installeres på skibets øverste dæk bag styrehuset.



Figur 17. Eksempel på tankprodukt fra Worthington

Valget af denne placering er styret af nemheden ved godkendelsesprocessen ift. sikkerhed ved en eventuel brand. Med opbygning af erfaringer fra de første brintfærger, vil man på sigt også kunne placere brinttanke og udstyr under dæk.

Sikkerhed

IMO og regelsæt for brugen af brændselsceller til søs

Skibsfart er en international industri, og sikkerhedsstandarder for skibsfart bliver derfor udviklet af den internationale søfartsorganisation IMO. IMO er det agentur under FN, som er ansvarlig for skibsfartssikkerhed og forebyggelse af skibsfartens forurening og udledning af drivhusgasser. Det er således IMO, der skaber den lovmæssige ramme for skibsfartsindustrien.

IMO har på nuværende tidspunkt ikke udviklet et specifikt regelsæt for brugen af brint og brændselsceller. Skibsredere er derfor henledt til at gennemgå den besværlige procedure for alternativ designs for at få verificeret brugen af brændselscelleanlæg.²

Man kan dog skele til det internationale regelsæt for skibe, der bruger gasser eller andre brændstoffer med lavt flammepunkt (IGF-code), som er obligatorisk for alle gasser og andre brændstoffer med lavt flammepunkt. Regelsættet indeholder dog kun en detaljeret beskrivelse for brugen af naturgas, LNG eller CNG som brændstof. For andre gasser og brændstoffer med lavt flammepunkt, herunder brint, kræver "IGF Code A", i overensstemmelse med

² FLAGSHIPS Clean waterborne transport in Europe Deliverable D5.1 Common applicable safety regulations and approaches.

På Brint over Fjorden

SOLAS-regel II-1/55, at man som tidligere beskrevet gør brug af den alternative designmetode til at demonstrere et tilsvarende sikkerhedsniveau.³

Brint:

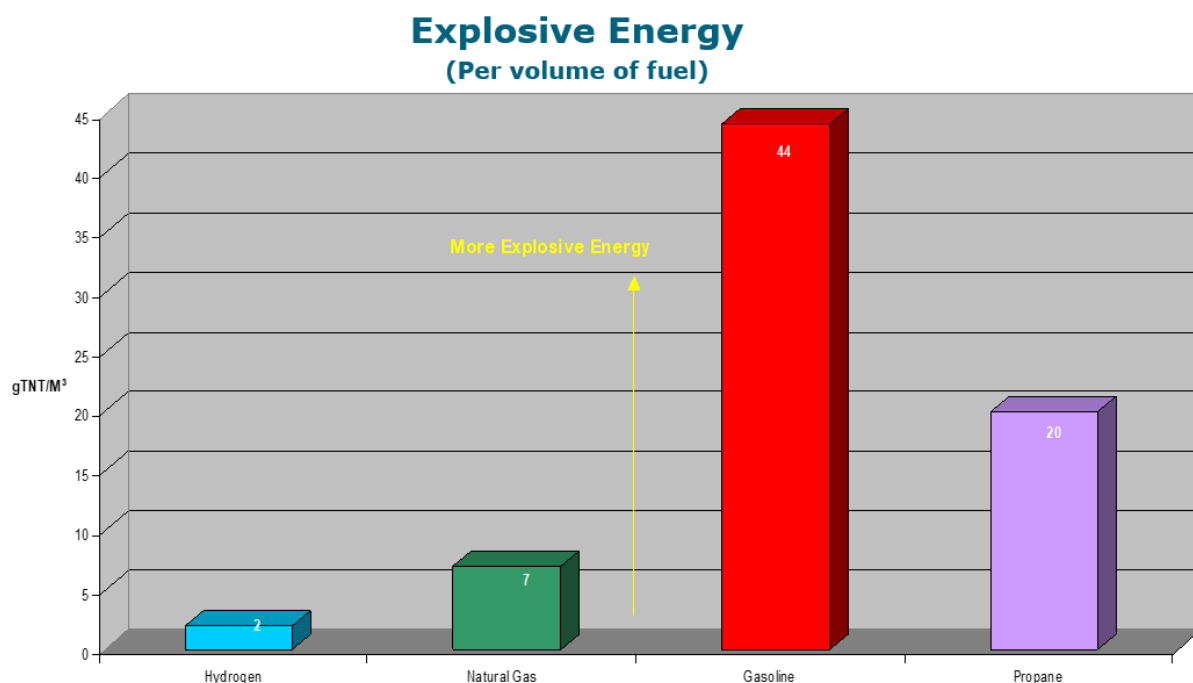
Overordnede sikkerhedsovervejelser ved brugen af brændselsceller og brint.

Brint er den letteste af alle luftarter. Det er samtidig også det mest enkle og mest udbredte grundstof i universet. Brint danner kemiske forbindelser med næsten alle andre grundstoffer og indgår i størstedelen af alle organiske forbindelser. Sammen med kulstof (carbon), ilt (oxygen) og H₂O (vand) er brint det vigtigste grundstof i levende organismer. Brint er derudover usynligt for det blotte øje og lugtfri.



Figur 17: Explosive range of Hydrogen"

Brint bliver eksplosivt, når det blandes med luft, som figur 17 indikerer. Blandingen er antændelig, når der er mellem 4% og 75% brint tilstede. Da brint er det letteste element, som vi kender, så spredes brinten meget hurtigt i luften, hvilket betyder, at blandingen hurtigt vil falde til under antændelighedsniveauet. Andre brændstoffer som naturgas og benzin har derimod tendens til at forblive inden for deres brandfarlige område i lange perioder efter frigivelse til det omgivende miljø.



Figur 18: Explosive Energy (per volume of fuel)

³ FLAGSHIPS Clean waterborne transport in Europe Deliverable D5.1 Common applicable safety regulations and approaches

På Brint over Fjorden

Hvis man sammenligner brints eksplosive kraft med andre brændstoffer, som vi ser gjort i figur 18, så ser vi, at brint pr. volumen brændstof i det værste tænkelige eksplosionsscenario, ikke har meget "bang-power" volumenmæssigt sammenlignet med andre almindelige brændstoffer.

Brint har samtidigt en meget hurtig forbrændingshastighed. Dette betyder, at brinten næsten altid antændes med et hørbart brag, hvor eksponeringen af varme eller ild for personale eller udstyr vil være ekstremt kort. Til sammenligning vil en lang og langsom forbrænding, som vi ser det med benzinbrande, være langt farligere. En brinteksplosion vil også udsende meget lave niveauer af strålingsvarme sammenlignet med naturgas og benzinbrande, der udstråler meget store mængder varmeenergi og derved eksponerer omgivelserne for en høj varmestråling, som hurtigt kan få ilden til at sprede sig og opsluge andre brændstofkilder.

	Gasoline/Diesel	Hydrogen
Irritating to the Skin and Eyes	Yes	
Toxic to Inhale	Yes	
Poisonous to Ingest	Yes	
Causes Particulate Pollution	Yes	
Produces Nitrogen Oxides (NOx) - smog	Yes	
Produces Sulfur Oxides (SOx) - smog	Yes	
Produces Carbon Monoxide (CO) when burned	Yes	
Produces Carbon Dioxide (CO₂) when burned	Yes	
Causes Global Warming	Yes	
Flammable	Yes	Yes
Lingers after a spill, posing a fire danger	Yes	

Figur 19: Hydrogen toxicity compared to Gasoline/diesel

Sammenligner man brints toksicitet med benzin og diesel, som i figur 19, vil man opdage, at brint ikke er giftigt som benzin og diesel. Det vil sige, at eventuelle lækager fra et brintdrevet skib, således ikke vil skade det nære vandmiljø som tilsvarende lækager af benzin eller diesel

Brændselscelle og brinttanken:

Brint vil være til stede både i brændselscellen og brinttanken. I forhold til selve brændselscellen vil der være meget lidt brint til stede sammenlignet med brinttanken. Brinten i brændselscellen bruges til at producere elektricitet med vanddamp som det eneste restprodukt. Da brinten konverteres løbende i brændselscellen, er det begrænset, hvor meget brint der er til stede i selve brændselscellen. For at sikre dette under en brand bruges en såkaldt "Thermally-Activated Pressure Relief Device" (TPRD), som er designet til sikkert at frigøre brinten fra brændselscellen.

Konklusion brint:

Brints naturlige egenskaber ved opdrift, hurtig spredning i luft, begrænset eksplosiv energi, meget lave strålevarmeenergi, ikke-toksicitet og hurtige udbrændingshastighed gør det til et langt mere sikkert brændstof end mange andre bredt accepterede brændstoffer, der anvendes i dag.

På Brint over Fjorden

Udover tankløsningen er der følgende systemer, som skal integreres og installeres "snedigt" med hensyn til optimeret drift og funktionalitet:

- Integration til el-systemet
- Integration til hydrogensystemet (tankanlæg)
- Integration til vandsystem (bortledning)
- Integration til ventilationsystemet (aftræk for luft og H₂)
- Integration med varmesystemet

IMO 1455

Søfartsstyrelsen:

Som tidligere omtalt har classeselskabet DNV-GL allerede udarbejdet regler om brintinstallationer, mens Søfartsstyrelsen (SOLAS) endnu ikke har egentlige regler på dette område.

På samme måde som med batterier skal en brændselscellen og brintinstallationen derfor godkendes iht. MSC.1/circ.1455 som alternativ design.

Installationen på færgen kommer til at bestå af to energikilder, nemlig brændselsceller og batterier, og derfor skal der i forbindelse med detailprojekteringen (når den endelige IMO1455 laves) gennemføres 2 Hazard Investigations, en for hver energikilde.

I dette forprojekt har partnerne valgt at anvende Ballard brændselsceller og Corvus batterier type ORCA. Fordi Corvus batteriet type ORCA er et ganske udbredt batteri, har vi valgt at genbruge IMO 1455 analysen fra et tidligere projekt. Når det endelige projekt skal gennemføres, skal hele IMO 1455 gentages alligevel, og partnerne i projektet har vurderet, at det ikke var her, vi ville bruge tiden bedst.

I dette projekt har partnerne valgt at gennemføre den først Hazard Investigation for brintdelen i samarbejde med DMA. Det endelige materiale skal desuden indeholde følgende:

- Design team
- General arrangement
- Overfartsbeskrivelse og ruteprofil
- Detaljeret beskrivelse af batteri system
- Detaljeret beskrivelse af FC system
- Hazard Investigation
- P&I Elektriske diagrammer
- P&I Rørdiagrammer
- P&I Ventilations diagrammer
- Referater fra møder med design team
- Evt.

Den første og foreløbige Hazard Investigation er vedlagt som bilag 6 – 200510.1005.01 Fuel Cell HAZID IMO 1455.

Brint leverance

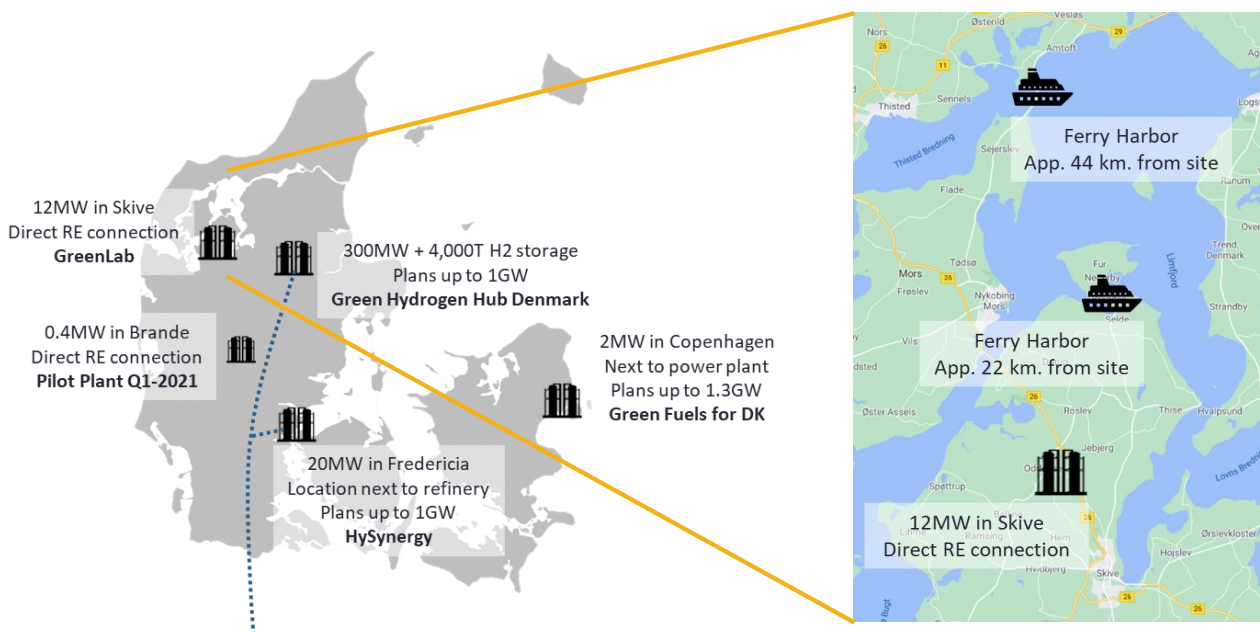
Everfuel og dets aktiviteter

Everfuel er en dansk virksomhed med hovedkontor i Herning, hvis kernekompetencer relaterer sig til projektudvikling, etablering og drift af infrastruktur til hhv. produktion, distribution og tankning af grøn brint. Everfuel ledes i dag af adm. direktør Jacob Krogsgaard – tidligere medstifter og administrerende direktør for H₂Logic og dernæst Senior VP i Nel Hydrogen – sammen med et ekspanderende team af eksperter indenfor brintteknologi, anlægsdrift og projektudvikling.

På Brint over Fjorden

Everfuel arbejder i dag 100 % dedikeret, bl.a. via innovative partnerskaber og teknologi/projektudvikling, med etableringer af effektiv, skalérbar og konkurrencedygtig distribution samt tankning af grøn brint, i en række europæiske lande og på tværs af de omstillingsparate transportsegmenter (primært tung transport).

I tråd med virksomhedens erklærede mission, igangværende aktiviteter (f.eks. PtX anlæg i GreenLab Skive og Fredericia plus drift af tankningsinfrastruktur i en række europæiske lande, inklusiv Danmark) samt erfaring fra øvrige projekter indenfor brint, bidrager Everfuel til Brint over Fjorden-projektet med viden, analyse og optimeringsforslag primært vedr. effektiv tilvejebringelse og tankning (bunkring) af grøn brint til en fleksibel, nul-emissions færgedrift.



Figur 20: Eksempler på sites, hvor brint i stor skala fra 2022 produceres i Danmark, primært fra fluktuerende vindstrøm

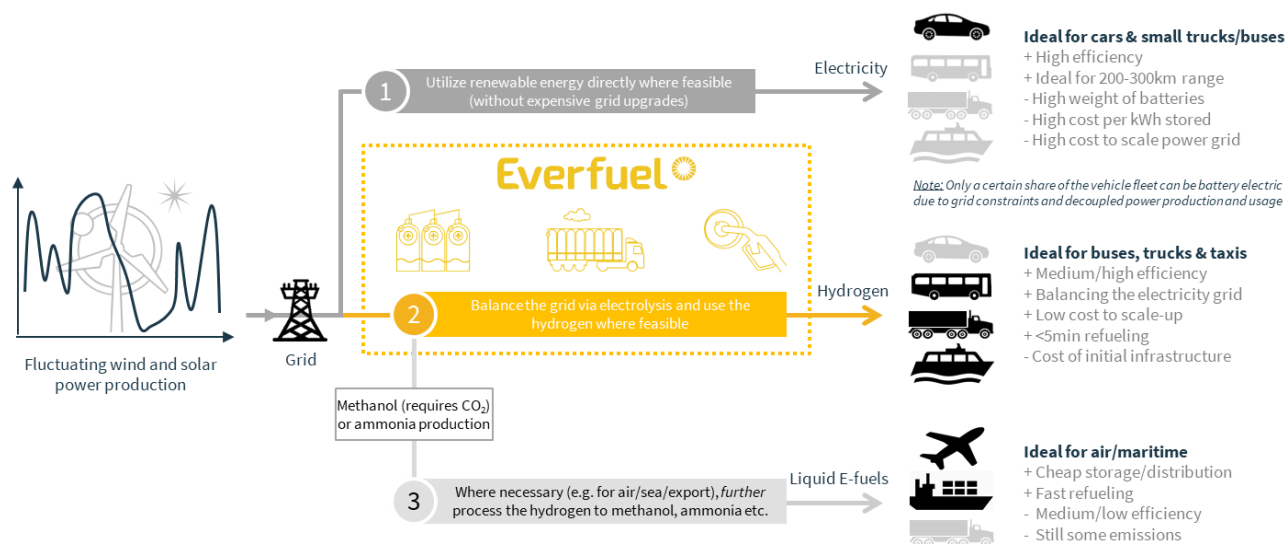
Everfuel har sammen med en række andre danske virksomheder og offentlige instanser forpligtet ressourcer og inngangsat projekter med sigte på at etablere en række skalérbare brintproduktionsanlæg i Danmark.

Disse anlæg vil i første omgang bidrage til den grønne omstilling indenfor tung vejtransport i Danmark samt til sænkning af CO₂-belastningen fra tung industri. Mens integreret distributions- og tankningsudstyr, der leverer brintbrændstof til busser, lastbiler og taxaer, allerede er teknologisk fremskredent og begynder at vise sig som en kommercielt bæredygtig mulighed for slutbrugere og infrastrukturoperatører i Danmark og internationalt, er distribution og tankning (bunkring) af brintfærger i et betydeligt tidligere stadium.

Når Everfuel investerer i det fornødne tankningsudstyr, distribution og relateret personale i forbindelse med leverance af brint, er det pågældende energiforbrug hos den givne klient alfa og omega i forhold til at kunne levere konkurrencedygtig brint. Til sammenligning ligger investeringsomkostningen (og således også afholdte afskrivninger og faste udgifter) ifm. tankningsanlæg, lager, distribution og aflønning af driftspersonel på stort set samme niveau, hvad enten en given brinttankstation skal levere brint tilsvarende forbruget hos en taxa eller 150 taxaer dagligt.

Eftersom omkostningen per leveret kg brint hænger sammen med investeringen i infrastrukturen, udover den rene energiomkostning per kg, handler det for leverandører såvel som slutforbrugere om at sammensætte en tilstrækkelig initialvolumen, således at de markante videre skalerings- og anvendelsesmæssige fordele ved brinten kan "lås op". En fjordfærge, som den type der indgår i dette projekt, har en række af disse nødvendige karakteristika for at kunne udnytte fordelene ved brint, heriblandt stort dagligt energiforbrug, behov for fleksibilitet samt et behov for at begrænse vægt og pladsforbrug ombord.

På Brint over Fjorden

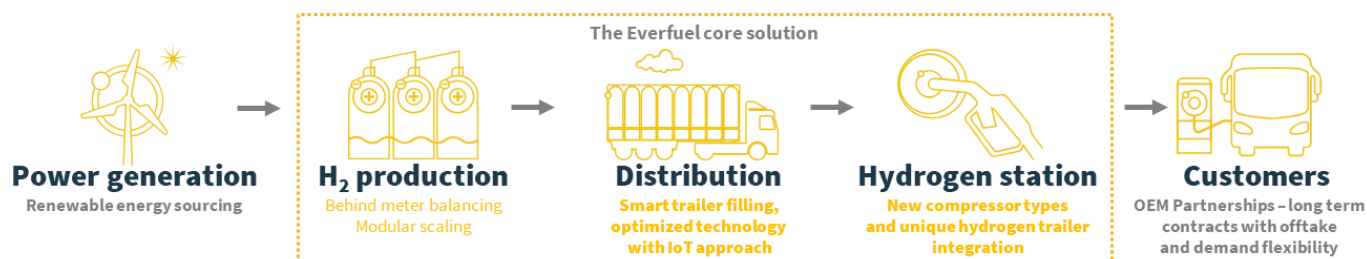


Figur 21: Power-2-X til transport

Vedrørende de fremadrettede perspektiver som dette projekt kan muliggøre, herunder hvorledes en leverance af brint til fjordfærger volumenmæssigt er sammenlignelige med leverance til brintbusser, uagtet at de specifikke tankningsløsninger og operationelle miljøer er forskellige, ses givet i supplerende beskrivelse i denne rapport's tidligere afsnit. Tilgangen til en videre udrulning af brint til f.eks. fjordfærger, vil i høj grad tage form af modulære løsninger jf. brintleverancen med tilpasningsmuligheder alt efter forbrugspunktets ønskede fleksibilitet/volumener. På samme vis som ved nulemissions-løsninger indenfor landtransport, indgår Everfuel's medarbejdere altid i tæt dialog med de involverede parter, for at finde den mest optimale løsning for driften, set fra et totalomkostningsperspektiv.

Brint værdikæden:

I dag er integreret distributions- og brændstofudstyr, der leverer brintbrændstof til vejkøretøjer (f.eks. busser, lastbiler og taxaer) allerede teknologisk pålideligt og begynder at vise sig som en kommercielt bæredygtig mulighed for slutbrugere og infrastrukturoperatører overalt i Europa og andre regioner af verden. Når det kommer til maritime applikationer, er tekniske løsninger og praktiske erfaringer til distribution og brændstofpåfyldning (bunkring) af brintfartøjer for øjeblikket på et tidligere stadium. Mens den maritime anvendelse af grøn brint kan dele de samme brintkilder (en række projekter i Danmark arbejder i øjeblikket med at etablere skalérbar elektrolyse til produktion af grøn brint), skal distribution og bunkring af den producerede brint til det maritime område videreudvikles, til optimalt at matche den nye kontekst, volumen og operationelle krav.



Figur 22: Integreret og skalérbar brint-værdikæde (Everfuel)

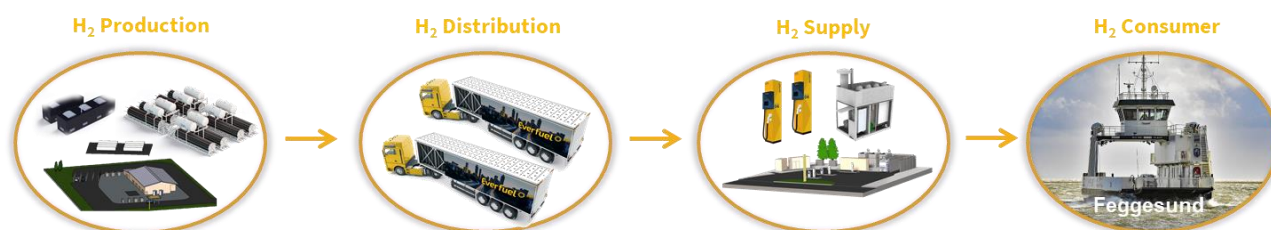
Sikker og stabil brintforsyning er nøglen til vellykket dekarbonisering. På internationalt plan ser en række udenlandske industriinteressenter og projektkonsortier rundt omkring i Europa intenst på brintløsninger som et alternativ / en variant til rent batteridrevne skibe af en række forskellige årsager. Brintforsyning er nøglen, og en række forskellige brintleverings- og bunkringsmetoder analyseres og evalueres. Projektkonsortiet sørger for at inkludere læring fra andre tilstødende gennemførlighedsundersøgelser og / eller internationale pilotprojekter, samtidig med at dette danske færgeløb effektivt kan udnytte synergier med andre danske brintinitiativer. F.eks. har grøn brint indtil 2021 kun været tilgængelig i meget små volumener i Danmark, men

På Brint over Fjorden

en række PtX projekter muliggør væsentlige reduktioner i omkostningen per kg brint produceret, bl.a. ved storskala samt øget fleksibel produktion på overskydende vindstrøm.

Med hensyn til projekternes brintdistributions- og bunkringsløsning vil konsortiet desuden implementere læring, bedste praksis og – i videst muligt omfang – hardwareløsninger fra f.eks. tankning af vejretøjer. Ikke desto mindre vil projektet opretholde et stærkt fokus på at udvikle, designe og demonstrere en løsning, der er optimeret til at levere grøn energi (brint) til fremdrift uden emissioner. En iboende del af dette klare udviklingsmål er, at den integrerede forsyningskæde har en pålidelig og skalérbar teknisk løsning, med begrænset pladsbehov, designet til replikering, nem betjening og et meget begrænset strømforbrug på selve bunkringsstedet (minimale netomkostninger i hhv. etablering og drift).

Hvad påvirker prisen?



Figur 23: Overblik over supply chain led, der påvirker brintprisen

Når der kigges på optimeringen af den resulterende brintomkostning, er der en række faktorer igennem forsyningskæden, der skal tages højde for. Forsyningskæden består af tre led, der har afgørende betydning for den endelige pris for bunkring af brint: produktionsleddet, distributionsleddet og selve bunkringsleddet. Disse led er hver især med til at påvirke slutprisen på brinten, og det er derfor afgørende at kende og forstå de enkelte faktorer, for at kunne optimere disse.

Brintproduktion:

Følgende faktorer står for udgifterne til produktion af brint:

- Kapitalomkostninger på etablering, udstyr, elektrolyse mv.
- Service og vedligehold på produktionsstedet
- Indkøb af grøn strøm (elektrolysen kan tændes/slukkes, til at matche svingende priser og el-overproduktion)

Følgende faktorer står for at drive priserne på produktion af brint ned:

- Kapaciteten på brintanlægget/elektrolysen
- Udnyttelsesgraden af anlægget
- Diverse grønne certifikater og drift via balanceringsydelser til el-nettet (øget VE andel = øget balancebehov)

Brintdistribution:

Følgende faktorer står for udgifterne til distribution af brint:

- Kapitalomkostninger på etablering, udstyr, brinttanke mv.
- Service og vedligehold på distributionsudstyret
- Prisen pr. kørt kilometer i forbindelse med distribution af brinten (chaufførløn)

Følgende faktorer står for at drive priserne på distributionen af brint ned:

- Kapaciteten i flåden af brinttransport
- Udnyttelsesgraden af flåden
- Typen af beholdere (Everfuel anvender moderne carbon-tanke, der kan transportere op til 1,5 ton brint/tur)

Brintbunkring:

Følgende faktorer står for udgifterne til tankningsanlæg:

- Kapitalomkostninger på etablering af tankningsfacilitet (mobile løsninger kan tillige anvendes)
- Service og vedligehold på tankningsanlægget
- Indkøb af grøn strøm (minimalt)

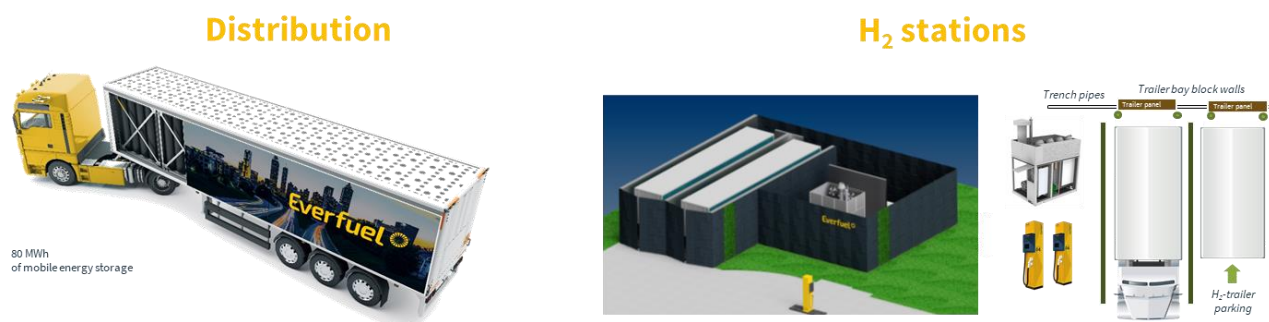
På Brint over Fjorden

Følgende faktorer står for at drive priserne på tankning af brint ned:

- Kapacitet og kompleksitet i tankningsløsning (forskellige løsninger kan implementeres)
- Udnyttelsesgraden af anlægget (optionen med mobile anlæg giver bedre udnyttelse af materiellet)
- Horisont på brintleverance: 5, 10, 20 år (relaterer sig til afskrivningshorisont m.v. på kapitalomkostningerne)

Faktorer, der påvirker den specifikke case

Med fokus på projektets to hovedcases, henholdsvis færgeoverfarten ved Feggesund og Fur, er der nogle afgørende faktorer, som vil påvirke brintprisen. På alle tre led i forsyningskæde er der fordele for casen, som forventes at være med til at sænke brintprisen for det endelige projekt. Med ny teknologi og modulære løsninger indenfor brændstoflagring og bunkringsanlæg, samt lokale grønne brintkilder, viser der sig både forsynings- og prismæssigt et godt potentiale for brintbunkring af fjordfærger.



Figur 24: Distributions og tankningsløsning til brint bunkring

Everfuel's setup er baseret på et mobilt brintlagersystem, der kan levere op til 1.200 kg. brint ad gangen. Ved at beholde brinten i mobile lagre, sænkes udgifterne til faste anlæg, der skal etableres på kaj, og er med til at øge udnyttelsesgraden af den lagerkapacitet, tanktrailerne er udstyret med. Dette gør både den enkelte case billigere, og øger muligheden for at tilpasse forsyningen til det forventede forbrug. Dette gør også, at bunkring- og lagringsløsningen kan flyttes, i tilfælde af at færgen måtte overgå til en anden rute, havn, eller hvis der opstår et bunkringsbehov andetsteds.

Med det mobile lager kan tillige følge et modulært bunkringsanlæg, der kan fremme tankningshastigheden yderligere efter behov. En option er dog at bunkre uden dette faste modul, men i stedet have et styringsmodul siddende på et mobile lager. Begge dele kan finde anvendelse, hvor den mobile løsning har sine forer ved lave kapitalomkostninger, og løsningen med et fast modul på bunkringsstedet kan betyde lavere operationelle omkostninger over tid. Løsningen med modulet på bunkringsstedet vil kræve areal svarende til en 20 fods container, og ligeledes have denne løsning forberedt til at kunne flyttes.

Se bilag 13 "marine bunkering" for beskrivelse af muligheden for fleksibelt, mobilt brint-bunkring

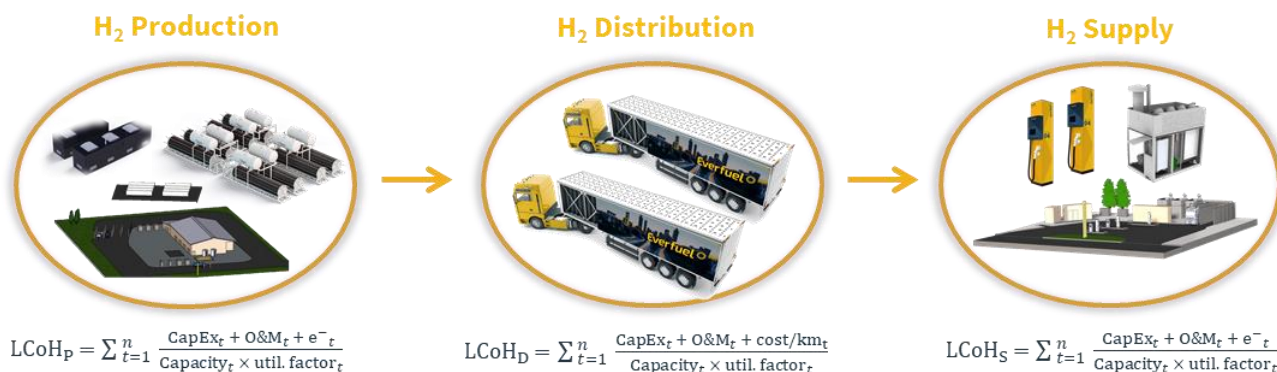
Figur 25: Tabel over interval for trailerudskift afhængig af forbrug. Afhængig af variationer i drift, brintproduktion og aftag.

Dagligt forbrug af brint	Interval for skift af mobilt lager (1200kg)
100 kg	11 dage
120 kg	9 dage
140 kg	8 dage
160 kg	7 dage
180 kg	6 dage
200 kg	5 dage

Med det hastigt udviklende netværk af kilder til grøn brint jævnt fordelt i Danmark vil der i hele landet være en høj grad af forsyningsikkerhed. Selvom produktionen måtte være begrænset i en periode fra en given kilde, vil forsyningsnetværket være med til at understøtte den grønne omstilling ved at kunne levere brint produceret af strøm

På Brint over Fjorden

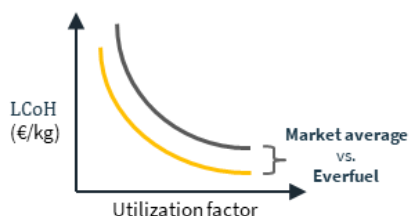
fra vedvarende energikilder fra en supplerende kilde. Dermed vil tiltag i form af omlægning af øvrige transportformer til brint som brændstof, og dertilhørende komplementære forsyningskæder og volumener i produktionen, ligeledes være med til at betyde kontinuerligt lavere omkostninger for grøn brint til transportsektoren, inklusiv de maritime behov.



Figur 26: Integreret brint-forsyningskæde (Everfuel). Såkaldt "Levelized cost of Hydrogen" optimeres ved volumen.

Everfuel's forretningsmodel bygger på at drive omkostningerne forbundet med grøn brintproduktion, -distribution og -tankning ned, gennem optimering af forsyningskæden helt fra lagring af den grønne strøm via brint, til tankningen af brinten sker hos slutbrugeren af den lagrede og distribuerede grønne energi.

For at understøtte dette, har Everfuel taget ansvar for at sam-optimere alle leddene i denne kæde, med både fleksibel produktion af brint, et optimeret distributionssystem (mobil lagring) og effektive tankningsløsninger, der er skalerbare og tilpasses slutbrugers behov. Med denne proces sikres det, at vejen til det sidste led i kæden, selve transportmidlet, er så konkurrencedygtigt som muligt, sammenlignet med konkurrerende brændstofløsninger. Hertil kommer også, at øget volumen på tværs af slutbrugere, fortsat teknologioptimeringer, anvendelse af Big Data til den operationelle styring og planlægning, samt øget mulighed for at lagre den grønne strøm på fleksibel måde (via balanceydelse til el-nettet når der er meget vind), samt en række andre integrerede parametre, alle er indtænkt fra dag ét i forsyningskæden, således at slutbrugere hver og én kan få gavn af fortsatte omkostningsreduktioner under PtX opskaleringen og øget implementation af VE.



Figur 27: Integreret og skalerbar værdikæde muliggør fortsat sænkning af den gennemsnitlige omkostning for grøn brint

Specifikke faktorer der påvirker Fur og Feggesundfærgerne indenfor de tre led i distributionskæden:

Brintproduktion:

- Udviklingen i Danmark indenfor udbygningen af storskala brintproduktion er med til at drive prisen ned på grøn brint, samtidigt med at forsyningsikkerheden stiger. Med vækst i balancemarkedet for grøn strøm, er mulighederne for at udbyde grøn brint stigende, da produktionen kan foregå fleksibelt i de billigere timer, hvor den grønne strøm dominerer el-spotmarkedet. Produktionen af den grønne brint vil til tider være et direkte alternativ til nedlukning af vindmøller, under timer og dage med "overproduktion".
- Det stigende fokus på grøn brint fra mange sektorer, herunder industri, P2X produkter samt transportsektoren, er med til at understøtte et stigende aftag fra de kommende produktionsanlæg fordelt i Danmark. Dette vil også komme færgerne til gode, med faldende priser der følger med storskala drift af brintproduktionen.
- Det stigende forbrug sikrer en høj udnyttelsesgrad af elektrolyseanlæg, som sikrer, at forrentningen af de investerede kapitalomkostninger fordeles blandt et stort netværk af aftagere. Derfor vil prisen hos den

På Brint over Fjorden

enkelte aftager, herunder færgerne, falde i takt med udbredelsen af brintforbrugende tiltag på tværs af Danmark.

Brintdistribution:

- Everfuel er med sin brintkilde i GreenLab Skive i stand til at source den grønne brint lokalt, hvilket sikrer lavere transporttider og derfor er en optimal mulighed for at sikre en økonomisk favorabel løsning. Dette er dog generelt tilfældet i Danmark, da det kommende netværk af grønne brintkilder er med til at sænke udgifter til transport af brinten til blandt andet færgelanlæg i Limfjorden og andre steder i landet.
- Med den stigende udnyttelsesgrad af distributionsnetværket grundet skaleringen i aftaget af grøn brint, vil kapitaludgifter bundet med lagring og transport falde løbende. Dette skyldes, at den enkelte mobile lagerenhed i stigende grad vil kunne benyttes i distributionsnetværket, og derfor vil udgiften til disse enheder blive fordelt over et større antal aftagere af grøn brint.

Brintbunkring:

- Selve bunkringsløsningen kan udføres på en sådan måde, at kompleksitetsniveauet under selve bunkringen vil være relativt lavt, sammenlignet med visse køretøjstyper i landtransporten, hvor der kan være tale om adskillige individuelle tankninger på kort tid. Dette er, sammen med et fornuftigt aftag fra færgerne, med til at sænke udgifterne til det enkelte bunkringsanlæg.
- Da en retrofittet færge forventes at have en lang operationstid, vil dette være med til at sikre en fornuftig afskrivningshorisont på etableringen af bunkringsløsningen.
- Potentialet i casen taler for, at prisen på grøn brint undertiden vil kunne komme under 5 Euro per kilo, hvis de rette forudsætninger forekommer i den specifikke case.

Case eksempel: Brintbusser i Region Nordjylland

Region Nordjylland har i Aalborg etableret et testanlæg med egenproduktion af brint samt udrulning af tre brintbusser, der skal være med til at afdække potentialet i brintdrevne bustransport i den offentlige sektor. Denne case har været med til at belyse væsentlige betingelser, der sikrer en økonomisk fornuftig drift og indkøb af det nødvendige udstyr og produktionsmateriel.

Kørslen med busserne har vist gode resultater hos brugerne og førerne, der alle oplever løsningen som pålidelig, rar og som noget, man kan være stolt af som chauffør. Ligeledes supplerer løsningen de elektriske busser godt med deres lange rækkevidde og korte optankningstid, der er sammenlignelig med konventionel dieseltankning. Dog er der også væsentlige ulemper ved etableringen af det lokale produktionsanlæg, der har været med til at fordyre den specifikke case.

- Brintpris: høj brintpris per kilo – dette er i høj grad grundet den lave volumen, som anlægget skal levere per krone investeret i anlægsudgifter.
- Med et lille anlæg er der ikke mulighed for at producere fleksibelt, samt udnytte den overskydende grønne kapacitet i elnettet.
- Kun tre busser i drift
- Dagligt forbrug ligger samlet på omkring 90 kilo.
- Det offentligt ejede anlæg er udfordret økonomisk grundet høje strømagifter, som større anlæg kan undgå.

Konklusion: busserne og brintteknologien er blevet taget godt imod af brugerne samt buschaufførerne, og busserne performer som de skal. Business casen kræver dog en højere volumen af brint, før den kan blive konkurrencedygtig. Teknologien er klar, men der skal volumen på for at drive prisen ned.

Case eksempel: Heinenoord busdepot (Holland)

Med etableringen af et busdepot med grønt brinttankningsanlæg, har den lokale myndighed i provinsen Zuid Holland sikret 100 % grøn offentlig transport til en fornuftig pris. Ved at sikre et aftag af brint på mere end 400 kilo brint om dagen fra en flåde på 23 brintbusser, har en konkurrencedygtig case kunnet etableres, som kan konkurrere med diesel, når man kigger på de samlede udgifter i ejerskabet af køretøjerne (TCO). En vigtig parameter heri kommer tillige fra et aftag af grøn brint over 12 år, der er med til at sænke prisen på anlægget, da dette kan afskrives over en lang periode.

- Brintpris: 5-6 Euro per kilo (inklusive alle anlægsomkostninger, service/vedligehold m.v.)

På Brint over Fjorden

- 23 busser i drift, med mulighed for udvidelse af busflåden (anlægget kan servicere op til 100 busser)
- Dagligt forbrug: +400 kg/dag
- 23 tankninger á 18 kg i døgnet. Dette øger Everfuel's udgifter til f.eks. service, men drastisk reduceret per kg brint

Konklusion: Med en langsigtet plan for brugen af brintbusser i provins Zuid Holland og med kontraktuelt, indekseret aftag af brint på 12 år, har brintprisen kunne sænkes markant og inkluderer alle omkostninger til leverancen. Dette er ligeledes grundet storproduktion af brint, frem for en lille, lokal produktion. Tillige er der for busoperatøren mulighed for at indsætte yderligere brintbusser på de omkringliggende ruter, som også kan tanke fra dette anlæg, uden behov for yderligere investeringer i anlæg, netforbindelser, plads eller lignende. Øvrig transport har også mulighed for tankning.

Feggesund/Fur færgeforbindelser:

Med etableringen af færgeforbindelser med energilagring i form af brint, vil Fur- og Feggesund færgerne udgøre et dansk gennembrud indenfor brugen af brint til transport. Dette vil være med til at fremvise muligheden for brint som brændstof i den maritime sektor og kan sammenlignes – både drift sikkerhedsmæssigt og økonomisk – med lignende, batteri-færgeforbindelser (færger hvor energilagringen er i form af en mængde ekstra batterier i stedet for brint). Dermed vil omlægningen til brint være et væsentlig skridt i udviklingen mod en bæredygtig og emissionsfri færgedrift i både Danmark og Europa.

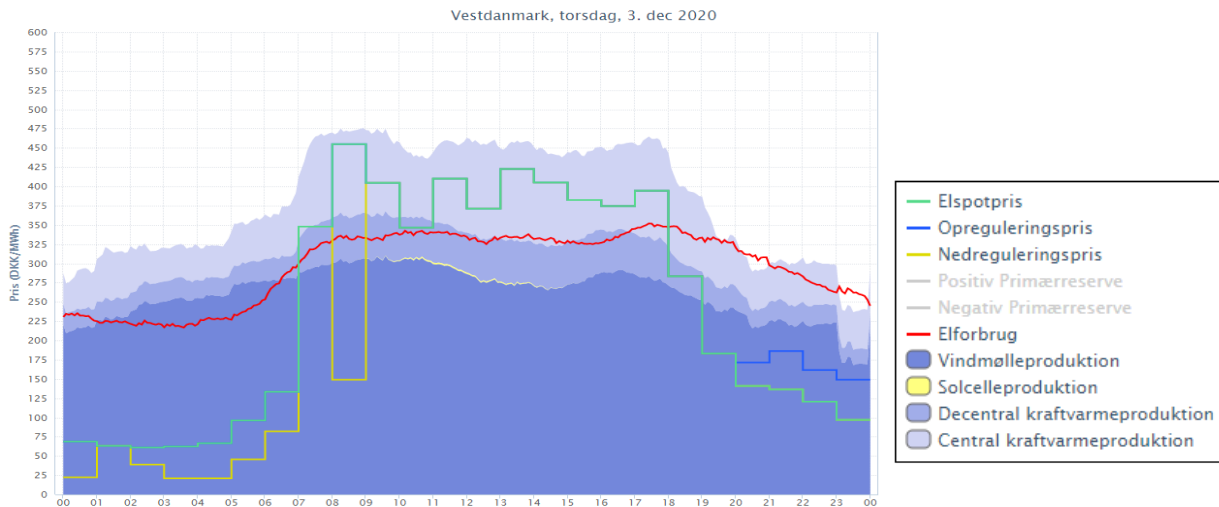
- Forventet brintpris: sammenlignelig med Zuid Holland casen eller lavere.
- Drift fra brintbrændselsceller koblet til mindre batteri, hvor energien til sejladsen bunkres og lagres i brintform
- Færgerne behøver dagligt kun at foretage én tankning á omkring 150 kg. Dette kan gøres i en påfyldning, som tilpasses nuværende "havnetid". Dette sikrer billig bunkring, da køling, kompression med videre minimeres. Dette resulterer i frafald af kompleksitet, der vil føre til lavere udgift til vedligehold, etablering med mere.
- Med et mobilt lager på sitet vil to løsninger kunne finde anvendelse: En løsning hvor bunkringen sker direkte fra det mobile lager, uden yderligere behov for anlægsetablering m.v. på kajen, samt en anden løsning hvor et modul med fast optaget areal etableres, kobles til det mobile lager og forestår bunkringen.
- Det mobile lager kan ydermere levere brint til flere forskellige bunkrings-steder langs Limfjorden, hvilket både sikrer fleksibilitet for færgedriften samt mulighed for at sænke omkostninger på sigt via øget volumen/deling af leveranceomkostninger.
- Med et brinttankningsanlæg vil der intet behov være for at udbygge den i forvejen begrænsede strømforsyning, der er til stede, både ved denne case og ved andre sammenlignelige cases. Sammenlignet med alternativet indenfor nulemissionsfremdrift – batterielektriske færger – mindskes udgifterne således til etableringsarbejde og udvidelse af elforsyningen.

Konklusion: ved etablering af brintbunkringsanlæg er der ikke behov for store opgraderinger af den eksisterende strømforsyning, og man kan etablere et meget fleksibelt tankningssystem, der sågar kan supportere flere havne. Dertil kommer den stigende efterspørgsel på grøn brint casen til gode, da dette er med til at drive prisen på brint ned.

Volumen på det specifikke site og det lave antal tankninger per dag er med til at reducere prisen på brint yderligere, mens den generelle skalering i forbruget af grøn brint nationalt bidrager til bedre udnyttelsesgrader på de store produktionsanlæg. Tillige har brint-vejen et stort potentiale hvad angår fastholdelse og skabelse af lokale arbejdspladser, både i forbindelse med produktionen, distributionen og bunkringen af den grønne brint. Dette i tillæg til bidraget til, at færre vindmøller må nedlukkes (og kompenseres) eller køre med ekstra dårlig økonomi grundet overproduktion, da den grønne brint kan produceres fleksibelt "som vinden blæser".

Det er således netop nu, med den stigende VE strømproduktion og voksende udsving i el-markedet såvel som voksende balancemarked for el, at kiloprisen per kilo brint falder, selv om gennemsnitsprisen på strøm forbliver den samme. I det perspektiv vil brint også være at anse som favorabelt overfor rene batteriløsninger, da strømmen kan anvendes fleksibelt, når prisen er lav på brintproduktionsstet. Til tider med flere dages mellemrum mellem start og stop af elektrolysen – samme fleksibilitet er sjældent mulig at profitere af i samme grad ved anvendelse af elektriske ladesystemer ude i distributionsnettet. Sådanne afledte værdier er dog ikke altid inkluderet i udbudsbetingelser med videre, hvilke er rammebetingelser den pågældende part, der byder ind på færgedrift, naturligvis skal indrette sig efter.

På Brint over Fjorden



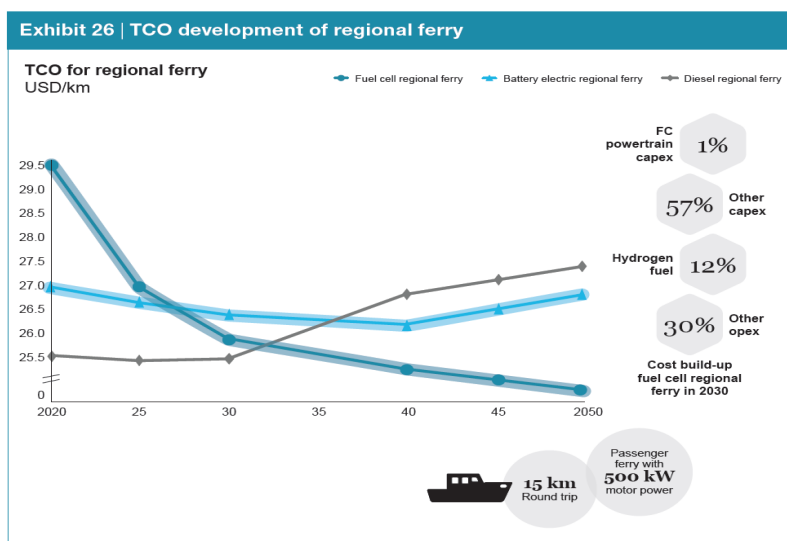
Figur 28: Elspotprisen (grøn) udvikling i Vestdanmark over 24 timer (kilde: EMD International)
<https://www.emd.dk/el/>

Status på brint og beskæftigelse

Mens brint/PtX og sektorintegration af den svingende produktion af vedvarende energi via brintproduktion nyligt er kommet på agendaen som en nøgle til den såkaldte "anden halvleg" af den grønne omstilling, kræves det imidlertid, at der foretages en række regionale såvel som nationale investeringer på området. Som støtte til denne udvikling har danske Everfuel for nylig forpligtet både kapital og tekniske ressourcer, sammen med andre industrielle partnere, til at fremme projekter, der sigter mod at etablere store produktionsanlæg for brint i Danmark. Dette gør sig bl.a. gældende i GreenLab Skive projektet, i Fredericia og i en række øvrige projekter. I tillæg hertil drifter Everfuel i dag en række anlæg til distribution- og tankning af brint til bl.a. taxaer, busser og den øvrige tunge/intensive transport.

Både energimængden og omstændighederne (beskæftigelsesmæssigt) svarer umiddelbart til et mellemstørrelses brintbus depot, hvor Everfuel f.eks. for nyligt har indgået kontrakt med leverance af brint i 12 år til et depot med 23 busser i Holland. Til at varetage en energileverance som denne, har Everfuel ansat dedikeret projektledelse, beskæftiger indtil flere entreprenørselskaber ifm. planlægningen og etableringen af tankningsanlægget, indkøber infrastrukturmateriel fra en række danske virksomheder (f.eks. Nel Hydrogen i Herning), samt vil efterfølgende have dedikerede medarbejdere til at levere brinten til anlægget, servicere anlægget og overvåge driften i 12 år. Et lignende beskæftigelses scenarie vil fremgå for brintleverance til fjordfærger som denne, hvortil Everfuel allerede i dag oplever stor interesse fra sammenlignelige færgeruter i både Danmark og udlandet. Med det hastigt voksende fokus på brint indenfor transportsektoren, og med det nylige fokus på brint i maritim kontekst, forudses lignende faldende omkostninger indenfor brintdrevne færger over de kommende år. Dette er blandt andet drevet af udviklingen i interesse for – samt pilotprojekter med – fjordfærger, samt fokus på reduktion af CO₂ og partikler i mobilitet generelt.

På Brint over Fjorden



Figur 29: Forventet total cost of ownership (TCO) for regional-færger (Path to Hydrogen Competitiveness (2020))

Status på brint

Industripartneren Everfuel's primære mål er at opfylde det såkaldte "missing link" mellem fleksibel produktion af grøn brint og behovet for effektive nulemissions-tankningsløsninger blandt især tunge transportoperatører til lands eller til søs. Mens buffering og sektorintegrering af den svingende produktion af vedvarende energi via brintproduktion er nøglen til den såkaldte "anden halvdel" af den grønne overgang, kræver det, at industrielle interessenter som Everfuel er villige til at investere en betydelig indsats og kapital i at udvikle og etablering af den nødvendige infrastruktur fra kilde til bunkring.

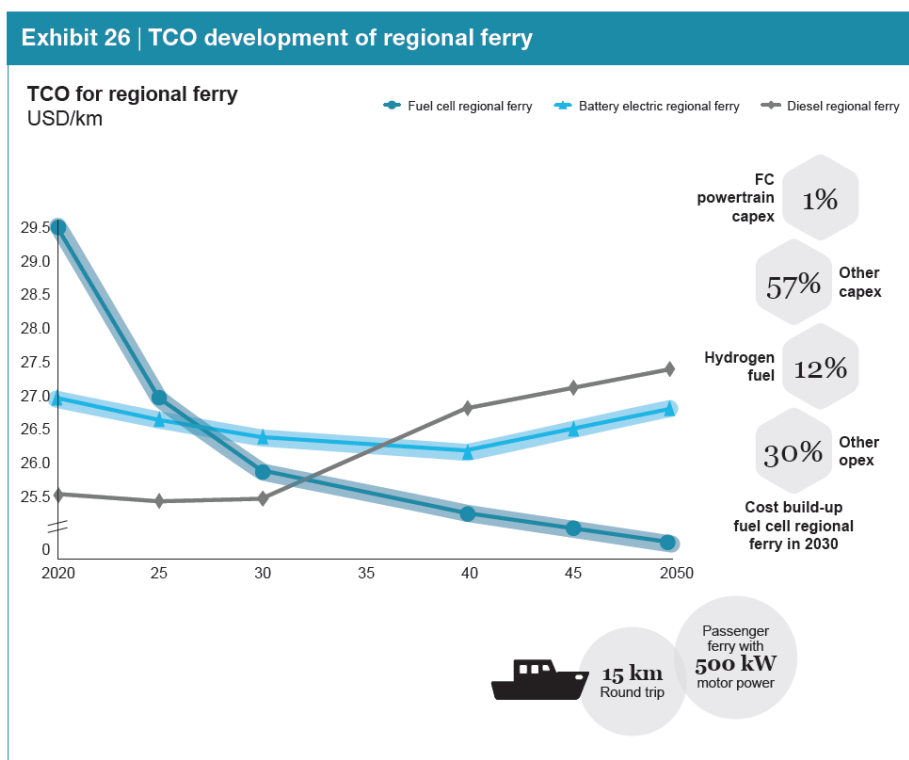
Som støtte til denne udvikling har Everfuel for nylig forpligtet både kapital og tekniske ressourcer sammen med andre industrielle partnere til at fremme projekter, der sigter mod at etablere store produktionsanlæg for brint i Danmark, og bidrager i øjeblikket til distributions- og brændstofprojekter til tung vejtransport i Danmark. Mens integreret distributions- og brændstofudstyr, der leverer brintbrændstof til busser, lastbiler og taxaer, allerede er teknologisk pålideligt og begynder at vise sig at være en kommercielt bæredygtig mulighed for slutbrugere og infrastrukturoperatører – især i tilfælde af mellemstore / store mængder – er tekniske løsninger og praktiske erfaringer med distribution og brændstofpåfyldning (bunkring) af brintfærger på et betydeligt tidligere tidspunkt i begge henseender.

Dette første projekt, inklusiv de løsninger og processer der kan udvikles af Everfuel og underleverandører såfremt projektet støttes, forventes at kunne være startskuddet for en række lignende projekter i årene efter.

På de mindre færgeruter viser brint sig som en passende løsning ud fra et nul- eller lavemission synspunkt. Batterifærger har vist sig at være omkostningstunge i etablering af strømforsyning, især i de tilfælde hvor elnettet skal opgraderes for at levere den nødvendige forsyning til lade anlægget. Modsat har fjordfærgernes størrelse vist sig for små til, at flydende brintløsninger, herunder e-fuels (ammoniak og metanol) vil være rentable brændstofløsninger.

Med det stigende fokus på brint indenfor transportsektoren, og med det nylige fokus på brint i færgindustrien, forudses en skarpt faldende pris indenfor brintdrevne færger over de kommende år. Dette er blandt andet drevet af udviklingen i fjordfærger i Europa samt i fokuset på CO₂-reduktion i transportindustrien rundt om i verden. Et stigende antal projekter fokuserer på mindre skibe med brint som drivmiddel, som sammen med projektet her vil være med til at demonstrere brint som en funktionel løsning indenfor regional transport.

På Brint over Fjorden

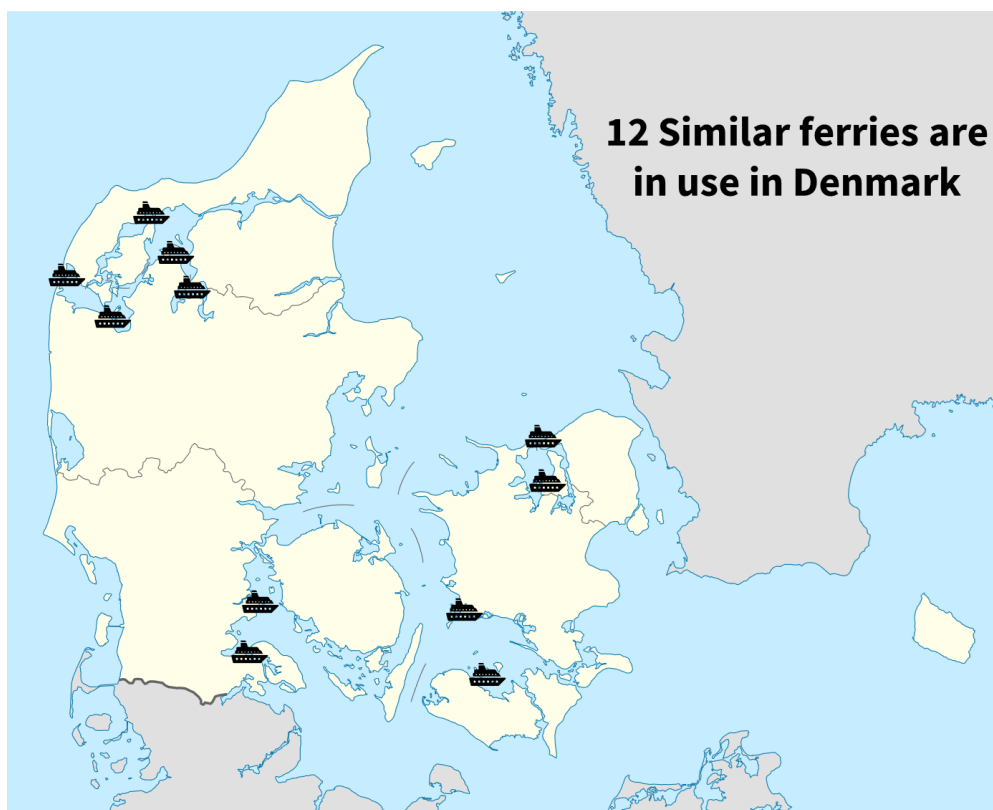


Figur 29: Forventet total cost of ownership (TCO) udvikling for regionalfærger (Path to Hydrogen Competitiveness (2020))

I Danmark findes omtrent 40 småfærger, der drives og finansieres af kommunerne. Derudover findes en række småfærger, der drives af private selskaber. Med udgangspunkt i småfærgerne behandlet i denne rapport, kan muligheden for at omlægge en række af disse færger til nulemission igennem en brintløsning, være klarlagt. Størstedelen af disse færger sejler i dag på diesel og udleder derfor en væsentlig mængde drivhusgasser, NOx-gasser samt partikler i luften, der er skadelige for mennesker og det omkringliggende miljø. Derudover vil kommunalt ejede småfærger som disse typisk udgøre en stor del af CO₂-regnskabet i de kommuner, hvor mange af disse drives.

Tager man udgangspunkt i de i alt 12 fjordfærger, der med deres lignende udformning og brug er direkte sammenlignelige med Fur og Feggesund færgerne, kendetegnes småfærgedriften ved korte ruter, som sejles i kommuner med mindre flåder af busser og tog. Derfor vil en omlægning af færgedriften på disse ruter til nulemission hurtigt kunne nedsætte de kommunale CO₂-regnskaber, og dermed bidrage til omstillingen af den offentlige og kommunale transport til en i højere grad CO₂-neutral løsning.

På Brint over Fjorden



Figur 30: Oversigt over replicerbare småfærger i Danmark

Fra dette projekt vil et samlet antal på 12 færger kunne direkte anvende erfaringerne med brændselsceller på Fur og Feggesund ruterne. Disse i alt 12 færger har i store træk samme konstruktion og udførelse. Erfaringerne fra dette projekt vil derfor kunne komme en lang række færger til gode, samt være med til at klarlægge mulighederne for, hvorvidt en omlægning til brintbaseret fremdrift vil være en økonomisk forsvarlig løsning for lokale færgeruter til nulemission.

Vækst og beskæftigelse inden for grøn omstilling

Green Hub Denmark

Flere analyser lavet af blandt andre den danske grønne tænketank *CONCITO* og *Dansk Energi* viser, at grøn omstilling skaber arbejdspladser. Ifølge *CONCITO* har der ikke bare været en stigning i antallet af grønne job inden for de seneste fem år, men den grønne økonomis effekt på den samlede danske økonomi er betragtelig. De beskriver den grønne økonomi som en økonomi, "der som ringe i vandet skaber positive gevinster for Danmarks økonomi (...)". I årene mellem 2015 og 2017 var der en stigning på 10 % af grønne årsværk fordelt ud over hele Danmark. Hovedparten fordelte sig i 2017 mellem Region Midtjylland (24.900 grønne jobs), Region Sønderjylland (18.600 grønne jobs) og Region Hovedstaden (17.700 grønne jobs).^[1] *CONCITO* referer ligeledes til *The New Climate Economy*, som har regnet på beskæftigelseseffekterne, hvilket viser, at investeringer i energieffektivitet giver tre gange så mange job pr. dollar sammenlignet med investeringer i fossil energiproduktion.^[2]

Ifølge nyeste rapport fra Danmarks Statistik fra november 2019 er eksporten af grønne varer og tjenester stigende. Danske virksomheder omsatte samlet set i 2019 for knap 247 mia. kr. af grønne varer og tjenester, hvilket er en markant stigning fra årene før (7 pct. mere end i 2018 og 24 pct. mere end i 2015). En interessant detalje i dette regnskab er de ressourcebesparende aktiviteter, som udgjorde hovedparten af omsætningen med 72 pct. Særligt er aktiviteten inden for omlægning af ikke-fossile energikilder stigende.^[3]

Dansk Energi har, i samarbejde med Fagbevægelsens Hovedorganisation, 3F, Dansk Metal og Arbejdsbevægelsens Erhvervsråd, udarbejdet og udgivet en konsekvensanalyse af beskæftigelseseffekterne af investeringer i den grønne omstilling, som er gjort tilgængelig i oktober 2020. Det er en analyse, som giver et positivt billede af den danske investering i det grønne og indleder rapporten med overskriften "klima og arbejdskraft går hånd i hånd." Rapporten

På Brint over Fjorden

peger på, at der vil opstå en merefterspørgsel efter arbejdskraft som konsekvens af store ekstrainvesteringer i det grønne (her særligt energi- og forsyningssektoren). Dansk Energi har ud fra Klimapartnerskabet for energi og forsyning identificeret investeringer på 316 mia. kr., som over de kommende 10 år skal indfri målsætningen om reduktion af drivhusgasser med 70 pct.

Konsekvensen af disse (store) investeringer på relativt kort tid vil skabe nye job og kræve, at nye opgaver bliver løst. Ifølge Dansk Energi skaber denne markante investering efterspørgsel på 290.000 ekstra årsværk på tværs af sektorer inden for den grønne omstilling i perioden til 2030 – årsværk der svarer til ca. 29.000 fuldtidsstillinger pr. år. Efterspørgslen vil ligeledes stige i perioden, hvilket ligeledes indebærer stigende pres på arbejdsmarkedet i denne periode.

Konklusionen rapporterne er således, at grøn omstilling skaber en merefterspørgsel efter arbejdskraft. Den markante grønne investering på 316 mia. kr. kræver, at nye opgaver skal løses. Tal fra Danmarks Statistik viser ligeledes, at eksporten af grønne varer og tjenester siden 2017, og særligt siden 2015, er markant stigende. Den grønne omstilling har en betragtelig effekt på Danmarks samlede økonomi, hvilket blandt andet ses på den samlede omsætning af grønne varer og tjenester i 2019, som lød på knap 247 mia. kr. Beskæftigelses- og væksttallene er dermed stigende og vil fortsat stige i perioden til 2030. Der vil være, og er allerede nu, en stigende efterspørgsel på årsværk, og ifølge Dansk Energi forventer man, at det i perioden 2030 tæller 290.000 årsværk.

På baggrund af udvalgte rapporter er der belæg for at sige, at projektet På Brint over Fjorden vil kunne skabe vækst og beskæftigelse i den danske maritime industri. Ydermere vil projektet være med til at styrke Danmark som en grøn vindnation. Formålet med projektet er netop at reducere Danmarks forbrug af fossile brændstoffer på de danske små-færger ved at benytte alternative brændselsceller. En tendens som Danmarks Statistik viser er stigende, og som skaber øget omsætning samt arbejdspladser.

[1] [DKGV-Beskæftigelsesanalyse.pdf \(concito.dk\)](#)

[2] [NCE 2016 \(newclimateeconomy.report\)](#)

[3] <https://www.dst.dk/da/Statistik/nyt/NytHtml?cid=32050>

På Brint over Fjorden

Beregninger (Feggesund Færgeren)

Forudsætninger

Årligt brændstofforbrug (2019 tal)		156.122 ltr.
Udgift brændstof (totalbeløb ex. moms, inkl. afgifter 2019 og rabat)		1.151.218 kr./år
Pris brændstof ex. afgifter + moms rabat fratrukket		3,82 kr./ltr.
Pris landstrøm (ex. afgifter + moms) - fastpris 0,2816		0,352 kr./kWh
Antal overfarter pr. år (2019)		26.272 ture
Tid pr. overfart		5 min
Forbrug pr. overfart	156.122 ltr./år / 26.272 stk.	5,94 ltr./overfart
Pris pr. overfart	1.151.218 kr./år / 26.272 stk.	43,80 kr./overfart
CO ₂ -udledning (2020)	156.122 ltr. X 2,66 kg/ltr./1.000	415,3 ton/år
Virkningsgrad dieselmotor		≈ 35%
Energiforbrug pr. overfart	5,94 x 10 kWh/ltr. x 0,35	38,6 kWh
Pris grøn brint	inkl. bunker trailer på kaj	37,5 kr./kg
Brændværdi brint		33 kWh/kg
CO ₂ -udledning (brint)		0 kg/kg

Fremtidigt forbrug:

Forventet brint forbrug (pr. år)	150 kg/døgn x 365 dage	54.750 kg/år
Brintforbrug pr. overfart	54.750 kg/år/26.272 ture	2,08 kg/tur
Udgift til brint	54.750 kg/år x 37,5 kr./kg	2.053.125 kr./år
Udgift pr. overfart	2.053.125 kr./år / 26.272 ture	78,20 kr./tur
CO ₂ -fortrængning	415,3 ton/år – 0 tons/år	415,3 ton/år

Investeringer:

	Mio. DKK
Skibets ombygning – tegningsarbejde, godkendelser til retrofitting, mv.	1,0
Elektrificering: Batteripakke 3 x 80 kWh, 2 x fuel cells, Switchboard, inverter	5,0
Brintsystem – fuelcell og tanke og tankningsløsning	9,0
Ombygning, stål- og værftsarbejde	5,0
I alt (Mio. DKK)	20,0

Tilbagebetalingstid: Da udgiften til brændstof forøges, vil der ikke kunne beregnes en tilbagebetalingstid på projektet. Der er ikke medregnet værdi på CO₂ og emissionsbesparelse, udover de afgifter der er i brændstofferne.

Links:

https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review20/st100_houchins_2020_o.pdf

<https://winddenmark.dk/nyheder/2020-boed-paa-rekordhoej-produktion-fra-landets-vindmoeller>

<https://www.danskeenergi.dk/nyheder/eus-kvotesystem-skal-fremme-groen-brint-co2-haandtering>

På Brint over Fjorden

Bilagsoversigt:

Bilag 1	General Arrangement M/F Feggesund
Bilag 2	Hazardous Hydrogen Area A
Bilag 3	Hazardous Hydrogen Area B
Bilag 4	Klassekrav - DnV-GL FC Power
Bilag 5	Battery HAZID IMO 1455
Bilag 6	Fuel Cell HAZID IMO 1455
Bilag 7	Single Line Diagram
Bilag 8	Curvus Batteri
Bilag 9	Danfoss
Bilag 10	E-Last beregning for MF Feggesund
Bilag 11	Hundested Gear
Bilag 12	H ₂ påfjorden Simuleringer (Ballard)