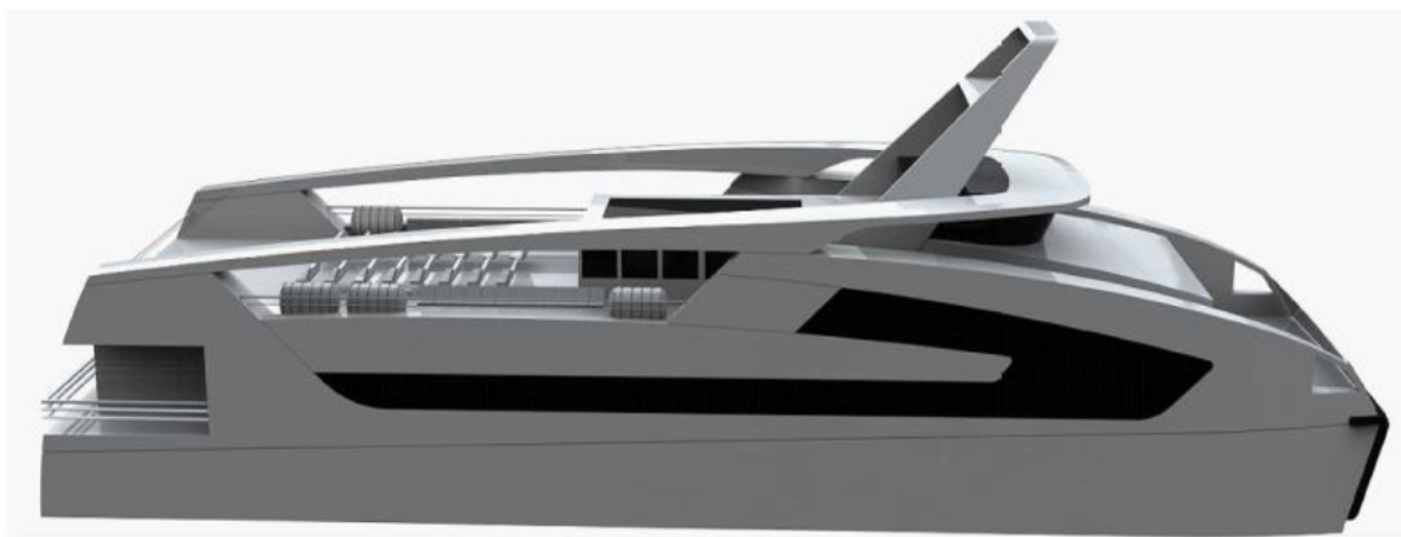


E-MARAN



Rapport fase 2 – Konsortiet Rødne Trafikk AS

Forord

Konsortiet ønsker å takke Trøndelag Fylkeskommune for å ha initiert til en slik konkurranse hvor bransjen kan få lære og ikke minst få utvikle ny teknologi. Videre vil vi takke Redrock Power Systems i Canada som har hjulpet oss med beregninger, samt løsninger for brenselceller og lagring av hydrogen. En spesiell takk også til Fjellstrand som har vært vertskap for flere møter med konsortiet. Til sist vil vi rette en stor takk til mannskapet på fartøyene vi reiste med på vår befaring i januar, som tok oss godt imot.

Sammendrag

På grunnlag av Trøndelag Fylkeskommune sin visjon om å «.... initiere utvikling av en teknologi som ikke eksisterer og som industrien ikke vet om de får til å levere» har dette konsortiet jobbet ut fra følgende problemstilling:

Er det mulig å gjøre hurtigbåtrutene i Trondheim utslippsfrie? Eventuelt når?

For å skape vårt forslag om en nullutslipps hurtigbåt, har en rekke beregninger, eksperimentelle tester, modelleringer og risikovurderinger blitt foretatt. I tillegg har vi bygget en testfarkost for å verifisere Lars Arne Bleie sin ide om en selvregulerende foil. Videre har konsortiet gjennom arbeidsprosessen med dette prosjektet studert gjeldende regelverk og hvilke steg som er nødvendige for å få en endelig godkjenning til å sette et fartøy med vårt konsept i drift. Blant annet må en formell utviklingsprosess i samarbeid med Sjøfartsdirektoratet gjennomføres, for å sikre en preliminær og endelig godkjenning. I tillegg må flere beregninger og eksperimentelle tester gjennomføres.

Det er flere steg som er nødvendige å ta før konseptet er modent nok for å settes inn i kommersiell tjeneste. Gjennom tester og beregninger har vi vist at det er mulig å gjøre hurtigbåter utslippsfrie. Et realistisk tidsperspektiv tilsier at vårt nullutslipps-konsept kan være klart til 2022-2023.

Innholdsfortegnelse

Forord	2
Sammendrag	3
1. Innledning	1
1.1 Konsortium	1
1.2 Problemstilling	3
1.3 Konsept	3
2. Regelverk	5
2.1 HSC-koden	5
2.2 IGF-koden	6
2.3 Universell utforming	6
2.4 DNV-GLs regler om batteri som energibærer	6
2.5 Preliminær godkjenning fra Sjøfartsdirektoratet	7
3. Metode	8
3.1 Litteratur	8
3.2 Beregninger	8
3.3 Risikobasert tilnærming	9
3.4 Befaring av eksisterende fartøy, ruter og kaianlegg	10
3.5 Numerisk analyse (CFD)	10
3.6 Eksperimentell testing	11
3.7 Design og modellering	13
3.8 Teknologimodenhet	14
4. Funn	15
4.1 Løsninger per samband	15
4.2 Struktur	16
4.3 Foil	17
4.4 Fremdrift	21
4.5 Design	30
5. Operasjon	31
5.1 Økonomi	31
5.2 Operasjoner og brukervennlighet	32
5.3 Mannskapsbehov og forventninger	33
6. Diskusjon	34
6.1 Hvorfor velge vårt løsningsforslag?	34
6.2 Hvilke konsekvenser vil en få ved å sette konseptet i tjenestebruk?	34
6.3 Hvilke tilrettelegginger må gjøres på land for at en skal kunne sette konseptet inn i tjenestebruk?	35
6.4 Teknologimodenhet – technological level of readiness?	35

7. Konklusjon	37
Vedlegg.....	38
Vedlegg 1. Flytskjema alternative drivstoff	38
Vedlegg 2. Risikomatrise	38
Vedlegg 3. General Arrangement fartøy med 130 passasjerer	38
Vedlegg 4. General Arrangement fartøy med 145 passasjerer	38
Vedlegg 5. General Arrangement fartøy med 195 passasjerer	38

Tabeller

Tabell 1 Skalering av hydrofoiler.....	13
Tabell 2 Løsninger per samband	15
Tabell 3 Spesifikasjoner for brenselceller	23
Tabell 4 Foreløpige propellerdata	27
Tabell 5 CAPEX fartøy	31
Tabell 6 OPEX fartøy	31
Tabell 7 Konseptets Technological Level of Readiness	36

Figurer

Figur 1 Bilder tatt under beforing, innløp til Vanvikan t.v. og Trondheim t.h.	10
Figur 2 Skisse av testfarkost 1	11
Figur 3 Skisse av testfarkost 1	11
Figur 4 Bilde etter første sjøsetting	11
Figur 5 Vingeprofilen til testfoilene	12
Figur 6 Testfoilens vingeprofil	12
Figur 7 Technological Level of Readiness.....	14
Figur 8 Tidlig modell og testfoilenes vingeprofil.....	17
Figur 9 Fra første test – fløy på første forsøk.....	17
Figur 10 Klargjøring til test	18
Figur 11 Fra første test.....	20
Figur 12 Fra andre test.....	20
Figur 13 Fra tredje test.....	20
Figur 14 Fra fjerde test.....	20
Figur 15 Sikkerhetsdiagram for hydrogen	22
Figur 16 3,5C battery recharge capacity vs. original vs. fuelcell option	24
Figur 17 6C battery recharge capacity vs. original vs. fuelcell option	24
Figur 18 Podder integrert i forbindelse med foil.....	26
Figur 19 Enlinjeskjema fremdriftskonfigurasjon	28
Figur 20 GA tegnet av Fjellstrand AS	30
Figur 21 Fartøy tegnet av Lars Arne Bleie	30

1. Innledning

På grunnlag av Trøndelag Fylkeskommunes behovs- og funksjonskrav har konsortiet gjennomført følgende oppdrag:

1. Utarbeidet en teoretisk løsningsbeskrivelse, ihht. funksjonskrav, gjeldende regelverk og som dekker Trøndelag Fylkeskommune sine tjenestebehov
2. Presentert forslag til løsning
3. Modellert/testet/utviklet modeller og prototyper
4. Verifisert energibærerens evne til bruk i hurtigbåt
5. Sikre preliminær godkjenning fra Sjøfartsdirektoratet
6. Beskrevet CAPEX og OPEX for konseptene
7. Beskrevet og evaluert våre konsepter som en helhetlig løsning for hurtigbåtdrift mtp. fylkeskommunens ønske om å stille krav om nullutslipp i sine kommende kontrakter

Resultatene av oppdragsgjennomførelsen er presentert i denne rapporten.

1.1 Konsortium

Vårt konsortium dekker hele verdikjeden fra konstruksjon og bygging, til drift av hurtigbåter. I tillegg har vi førstehånds kunnskap om hydrofoiler (Foilcat) og batteridrift (Ampere). Kunnskapsbasen dekker dermed ingeniørdisiplinene som skal til for å kunne realisere en nullutslipps hurtigbåt.

Luftregulering av hydrofoiler er kun løselig omtalt i litteraturen uten videre teorier, og er dermed nybrots-arbeid i verdenssammenheng som hovedsakelig må baseres på modellforsøk. Konsortiets sammensetning av kunnskap og erfaring, sammen med tilgjengelig teori innenfor de ulike fagområdene, er dermed svært viktig for å kunne etablere et såkalt proof of concept. Konsortiet består derfor av:

L. Rødne & Sønner AS med datterselskap Rødne Trafikk AS

Kontaktperson: Lars A. Rødne

Et av Norges største hurtigbåtrederier, som ble stiftet i 1956. Rederiet har høy kompetanse og lang erfaring innen drift av hurtigbåt som kombineres med det mest moderne innen båtmateriell. Selskapet har alltid vært opptatt av innovasjon og nyvinninger og har derfor en erfaring som gjør at det i dag er fremst innen drift og bygging av mindre hurtigbåter.

De viktigste innovasjons- og utviklingsprosjektene til rederiet er følgende fartøy:

- M/S Rygeraa, 1988 – Første og eneste hurtigbåt med vribar overflatepropell fra Servogear
- M/S Rygerdoktoren, 2002 – Verdens første sivile fartøy bygget i karbon

- M/S Rygerkatt, 2003 – Verdens første katamaran bygget i karbon sammen med Brødrene Aa
- M/S Rygervakt, 2011 – Første kommersielle fartøy med IPS-fremdriftssystem
- M/S Rygerøy, 2013 – Ble i 2017 første hurtigbåt som oppfyller IMOs TIER III krav om utslipp til luft

Rederiet driver passasjertrafikk (for Kolumbus i Rogaland og Skyss i Hordaland), turistruter og ambulansebåter på Vestlandet. Selskapets hovedkontor er på Sjærnørøy, hvor vi også har eget verksted som utfører vedlikeholdsarbeider og reparasjoner på båtene. I tillegg har rederiet salgskontor i Stavanger og Bergen.

Fjellstrand AS

Kontaktperson: Edmund Tolo, Sales manager

Fjellstrand AS er et veletablert skipsverft som leverer flere ulike fartøystyper, blant annet hydrofoiler, hurtigbåter og ferjer til kunder i hele verden.

Tidligere innovasjons- og utviklingsprosjekter:

- Utviklet symmetriske skrog som ble en suksess og ble masseprodusert i Norge og på lisens i Singapore på 1990-tallet
 - Hydrofoilen FoilCat, 1995 – Opererer fortsatt i rute mellom Hong Kong og Macao
 - Batteriferjen M/F Ampere, 2014 – Verdens første ferje med hel-elektrisk fremdriftssystem
 - Skal bygge hel-elektrisk hurtigbåt som skal operere mellom Stavanger og Hommersåk.
- Utviklingsprosjektet inkluderer vektoptimalisering med hensyn til materialvalg

Echandia Marine AB

Kontaktperson: Magnus Eriksson

Echandia Marine AB er en leverandør av elektriske propulsjonssystemer, og spesialisere seg innen elektrifisering av eksisterende og nye fartøy, og utvikling av systemer for nullutslipp. Systemintegrasjon inngår også i bedriftens kompetanse. Echandia har også inngått et strategisk samarbeid med Redrock Power Systems, Canada, om utvikling og sertifisering av brenselcellesystemer for maritimt bruk.

Tidligere innovasjons- og utviklingsprosjekter selskapet har bidratt i:

- Fartøyet BB Green – verdens raskeste elektriske hurtigbåt
- Fartøyet Movitz – verdens første superladede el-ferje
- Skal levere batterisystem til havnebåter som skal bygges av Damen verft
- LTO batteriutvikling og leveranse til fartøy-, vind- og tog-applikasjoner

Scalesia AS

Kontaktperson: Lars Arne Bleie

Selskapet leverer konsulentttjenester innen design. Lars Arne Bleie er utdannet industridesigner i Italia, diplomøkonom og Master of Management fra BI. Han har variert industrierfaring. Bygget og testet på 90-tallet modellbåter med formål å redusere friksjon i vann hos Maran Utvikling AS.

Bidrar som:

- Prosjektleder
- Ideutvikler av neddykkede foiler

Han har også være prosjektets kontakt med fagmiljø, blant annet Marintek Ocean og NTNU.

Maran Utvikling AS

Kontaktperson: Sigmund Bleie

Selskapet leverer konsulentttjenester innen båtkonstruksjon, kvalitetssystemer og hydrostatikk.

Sigmund Bleie er utdannet flyger på 60-tallet og maskiningeniør fra Stockholm. Han var med på å utvikle de første stupelivbåtene til Harding, utviklet de første symmetriske skrogene til Fjellstrand og har senere konstruert og bygget båter til oppdrettsnæring i tillegg til ingeniørtjenester. Han har for egen regning også utviklet og testet utallige skrogdesign.

Bidrar med:

- Testfarkost
- Kunnskap om testing, skalering, hydrostatikk og -dynamikk i tillegg til aerodynamikk

1.2 Problemstilling

Trøndelag Fylkeskommune har i sin prosjektbeskrivelse presentert en visjon om å «... initiere utvikling av en teknologi som ikke eksisterer og som industrien ikke vet om de får til å levere». Videre har Trøndelag Fylkeskommune i sine behovs- og funksjonskrav beskrevet et ønske om å verifisere om det er mulig å bygge en nullutslipps hurtigbåt, og at «*Konsortiene skal levere et fullverdig hurtigbåtkonsept der alle detaljer av fartøy er beskrevet.*» (*Kundens behovs- og funksjonskrav, s. 2*)

På grunnlag av dette har konsortiet jobbet ut fra følgende problemstilling:

Er det mulig å gjøre hurtigbåtrutene i Trondheim utslippsfrie? Eventuelt når?

1.3 Konsept

For å besvare problemstillingen har vi utviklet to konsept. Det første konseptet er en nullutslipps hurtigbåt som drives frem av podder med integrerte elektromotorer. Poddene er innlemmet i forbindelse med foiler som ved hjelp av hydrodynamisk trykk løfter fartøyet ut av vannet og slik reduserer energibehovet betraktelig. Foilene har ingen bevegelige deler for styring av bevegelser. De er

satt sammen slik at de er fullstendig selvregulerende for både dypgang og stabilitet. Energi lages ved hjelp av hydrogen som omformes i brenselceller, og fraktes til poddene gjennom foilenes strutter (fra engelsk «struts»).

Dette konseptet er tenkt brukt på sambandene Trondheim-Brekstad og Trondheim-Kristiansund.

Det andre konseptet er en nullutslipps hurtigbåt som drives frem av podder med integrerte elektromotorer. Poddene er festet til skroget, og har batterier som energibærere.

Dette konseptet er tenkt brukt på ruten Trondheim-Vanvikan.

2. Regelverk

Konsortiet kontaktet tidlig i fase 2 Sjøfartsdirektoratet for å kartlegge gjeldende regelverk, og hvilke hensyn en spesielt må ta ved utvikling av nye konsepter for energibærere og lagring av denne.

Sjøfartsdirektoratet ga da følgende anbefalinger:

- For systemer med foil se på krav gitt i HSC-koden
- For systemer med hydrogen som energibærere se på krav gitt i IGF-koden

2.1 HSC-koden

Ettersom fartøyene vil være hurtiggående faller de under HSC-koden. HSC-koden er godt kjent for konsortiets medlemmer. Men, spesielt for vårt konsept er at fartøyet skal være hurtiggående på foiler. Regelverket er derfor studert spesielt med tanke på foilkonseptet, som vil falle under reglene som gjelder for helt neddykkede foiler, omtalt i kapittel 2 om oppdrift, stabilitet og inndeling. Helt neddykkede foiler betyr en foil som ikke har noen løftekomponenter som bryter overflaten i foilbåren modus (2.1.3.2). Fartøyene må oppfylle punkt 2.1.1 som sier at de skal ha stabilitetskarakteristika og stabiliseringssystemer passende for sikkerhet når det opereres i ikke-deplasement modus (altså er i foilbåren modus) og i overgangsmodus. Videre skal det ha stabilitetskarakteristika i ikke-deplasement modus og overgangsmodus til å ta fartøyet trygt til deplasement-modus (skrogbåren, ikke på foil) i tilfelle systemfeil.

For å vise at en oppfyller kravene i kapittel 2 kan en demonstrere dette blant annet ved å benytte modelltester, kalkuleringer og fullskaletester (2.1.5). Modell- eller fullskala tester / kalkuleringer skal inkludere hensyn til en rekke kjente stabilitetsfarer som er kjent for hurtigbåter, blant annet:

- Retningsinstabilitet, som ofte er koblet til rulling og stamping
- Broaching (miste retningsstabilitet) og bow-diving (baugstuping) i følgende sjø
- Baugstuping av planende enkeltskrog og katamaraner på grunn av dynamisk tap av langskips stabilitet i relativt rolig sjø

Testene / kalkuleringene skal bevise at fartøyet etter å ha vært utsatt for rulling, stamping, hiv o.l returnerer til kondisjonen det hadde i utgangspunktet (2.1.6).

Hele Annex 6 omhandler stabilitet for hydrofoil, og regel 2 i dette annekset omhandler helt neddykkede foiler. Stabiliteten i skrogbåren modus skal oppfylle HSC-kodens krav i 2.3 og 2.6.

Krengemoment som utvikles når fartøyet manøvreres/svinges i deplasementmodus:

$$M_R = 0,196 * (V_0^2/L) * \Delta * KG \text{ (kNm)}$$

I deplasement-modus skal fartøyene i alle tillatte lastekondisjoner opprettholde en krengevinkel mindre enn 10 grader når utsatt for momenter som gitt i annek 6.

2.2 IGF-koden

Konseptet med bruk av hydrogen vil falle under IGF-koden, som inneholder funksjonelle krav for alle komponenter og arrangementer relatert til bruk av brennstoff med lave flammepunkt.

I IGF-kodens del A, punkt 2.3 er alternative design omtalt. I 2.2.3 står det at brennstoff, komponenter, og arrangementer av systemer for brennstoff med lave flammepunkt kan enten:

1. Avvike fra de som er beskrevet i IGF-koden, eller
2. Være designet for bruk av et brennstoff som ikke er spesifikt beskrevet i IGF-koden.

Slike brennstoff, komponenter, og arrangementer kan bli brukt forutsatt at disse møter intensjonen med målet om sikkert og miljøvennlig design, funksjonelle krav, og ivaretar tilsvarende nivå av sikkerhet innenfor de relevante kapitler i koden. I slike tilfeller skal likeverdighet med et alternativt system demonstreres. Demonstrasjon av dette kan gjøres i form av risikovurderinger.

2.2.1 Forskrift om skip som bruker drivstoff med flammepunkt under 60 °C

IGF-koden er gjort gjeldende i norsk regelverk gjennom forskrift om skip som bruker drivstoff med flammepunkt under 60 °C. Alle fartøy som vil benytte brenselceller og hydrogen som drivstoff faller under denne forskriften. Likeverdighetsprinsippet står sentralt også her; sikkerhetsnivået på fartøy med drivstoff med lave flammepunkt skal være like godt som det på dieseldrevne fartøy. Forskriften gir videre krav om at alt utstyr som inngår i tank- og drivstoffsystemet skal være godkjent eller typegodkjent fra f. eks. DNV-GL. I del B beskrives funksjonskrav relatert til eksplosjonsfare, krav om risikoanalyse, og arrangementer og utforming. Videre skal klassifisering av eksplosjonsfarlige områder utføres og det skal sikres at det ikke er atkomst til de klassifiserte områdene for uvedkommende. Forskriften gir også krav til utprøving av systemene, samt til drift og vedlikehold.

2.3 Universell utforming

I forskrift om bygging av skip, kapittel 2 er det satt krav til at passasjerskip skal oppfylle krav gitt i MSC.1/Circ.735 om universell utforming og sikkerhet for personer med nedsatt funksjonsevne med de tilpasninger som kreves for skipet. Dette inkluderer blant annet krav til:

- Adgangsfasiliteter
- Reserverte rullestolplasser
- Bredde på døråpninger, korridorer og landganger
- Toaletters størrelse, plassering og adkomst

2.4 DNV-GLs regler om batteri som energibærer

DNV-GLs regler om batteri som energibærer vil bli gjeldende for vårt løsningsforslag for ruten mellom Trondheim og Vanvikan. Reglene setter krav til blant annet:

- Batterirom, dets plassering og arrangement
- Ventilasjon
- Thermal runaway
- Slukkesystemer
- Sikkerhet

2.5 Preliminær godkjenning fra Sjøfartsdirektoratet

Tidlig i fase 2 var representanter fra konsortiet i møte med Sjøfartsdirektoratet blant annet for å avklare hvordan en utviklingsprosess foregår når en utvikler et fartøy med annen energibærer enn de som tradisjonelt benyttes. I slike tilfeller er det vanskelig å finne tydelig frem til hvilke regelverk som skal anvendes og hvordan de skal anvendes. Sjøfartsdirektoratet fremla i møtet et diagram som synliggjorde prosessen for oss (se vedlegg 1), et diagram som senere ble utsendt til alle konsortiene fra Trøndelag fylkeskommune. Diagrammet viste hvilke steg som må tas for å kunne få en preliminær godkjenning av et fartøy som har et alternativt brennstoff eller system, fra Sjøfartsdirektoratet. I korte trekk ble konsortiet fortalt at en slik prosess handler om at alle deler av konseptet risikovurderes, at den fort kan få en varighet på 10 måneder, i tillegg til å være kostbar. På grunnlag av dette ble det vurdert at en for dette prosjektet ikke ville kunne få en preliminær godkjenning innen tidsfristen for innlevering av rapport den 1 september 2019 på grunn av tidsmangel og økonomi.

3. Metode

I tillegg til å benytte konsortiets brede og lange erfaring innen hurtigbåtsutvikling, har vi benyttet følgende metoder.

3.1 Litteratur

Det har blant annet blitt hentet inspirasjon og bekreftelse fra litteratur. Litteraturen sier svært lite om luftregulering av foiler, men Ray Vellinga har vært innom ideen. I tillegg har Baron Hanns von Schertels patenter og arbeider vært inspirasjon til utviklingen av hydrofoilene Rodriguez og Supramar. Von Schertels arbeid har derfor også blitt studert i løpet av dette utviklingsprosjektet.

3.2 Beregninger

Sentralt i konsortiets tilnærming til problemstillingen, har vært å foreta vekts- og energiberegninger. Dette for å kunne avgjøre energibehov/thrust, samt dimensjonere størrelse på brenselceller, hydrogentanker, batterier, elektromotorer, propeller og foiler. Riktig dimensjonering og optimalisering av disse komponentene er svært avgjørende for å kunne opprettholde sambandene med den passasjerkapasitet og fart som opereres med i dag.

Dagens fartøy er moderne og optimalisert med hensyn til vekt. Konsortiets vekts- og energiberegninger er foretatt med utgangspunkt i disse fartøyene. I første fase arbeidet vi ut i fra en hypotese om å redusere energibehov/thrust med 30 % i forhold til dem. I andre fase har vi gått gjennom dagens fartøy, rutetabell, samt gjennomført fysiske tester med modell for å underbygge vår hypotese. Reduksjon av energibehov vil hovedsakelig gjøres gjennom å løfte fartøyet ut av vannet ved bruk av foil og slik redusere våt flate på to av sambandene. På sambandet mellom Trondheim og Vanvikan vil energibehovet reduseres ved bruk av et optimalisert skrogdesign og fremdriftssystem (turtall, propelldiameter og akselvinkel).

For å utføre beregningene brukte vi i fase 1 dagens fartøy som referanse for vekt og energi. Komponenter som ikke er inkludert i vårt konsept ble trukket fra, og erstattet med vektorer på komponenter som inngår. I fase 2 har Fjellstrand AS utført vektberegninger bottom-up av komplette fartøy. Alle systemer er gjennomgått for å få et så realistisk vektregnskap som mulig ved beregning. Dette inkluderer optimalisering av hydrogentanker, brenselceller med tilhørende styresystemer, og batterisystemer. I tillegg har vi sett på rutetabell fra et kommersielt perspektiv, og anbefaler Trøndelag Fylke å satse på en høyere frekvens med litt mindre fartøy. Båtene i dag er dimensjonert for toppene i reisemønster (fredag og søndag) og at alle passasjerer reiser hele distansen. Vi har søkt å dimensjonere fartøyene slik at toppene kan møtes, ved å ha flere daglige avganger. Med dette har vi i våre beregninger klart å redusere fartøyenes vekt og størrelse. Dette medfører flere positive effekter,

blant annet på foilenes størrelser, da et foilsett (med mindre justeringer) kan benyttes på alle farkostene. I tillegg kan en benytte samme design på alle fartøy, med kun få justeringer.

Ut fra dette er energibehovet for en overfart og nødvendig kraft for å kunne produsere denne energien, funnet.

Det er også utviklet driftsprofiler for alle samband for å synliggjøre hvordan energibehovet fordeles i løpet av en dag i rute og hvordan en møter dette, i tillegg til forbruk. Videre har konsortiet beregnet investeringskostnader (CAPEX) og driftskostnader (OPEX) for konseptet i bruk på de ulike sambandene.

3.3 Risikobasert tilnærming

Under møtet med Sjøfartsdirektoratet i januar ble det understreket at en risikobasert tilnærming er viktig under et utviklingsprosjekt der en skal benytte brennstoff og teknologi som ikke er nevnt i regelverk. En risikomatrise ble derfor satt opp for å kartlegge de risikoer som en kan se med bruk av den teknologien og fartøystypen som er valgt av dette konsortiet. Videre er matrisen benyttet til å finne løsninger for å minimere de identifiserte risikoene. Matrisen har under prosjektet vært et levende dokument, og oppdatert etter hvert som ny kunnskap har dukket opp. Risikomatriksen ligger som vedlegg 2.

3.4 Befaring av eksisterende fartøy, ruter og kaianlegg

I januar 2019 reiste samtlige deltakere i konsortiet på befaring til Trondheim for å se fartøy og samband som ønskes erstattet og utført med nullutslipps hurtigbåter med egne øyne. Dette gav deltakerne et helhetlig bilde av fartøy og samband, og hvordan de driftes. Like viktig ga befaringen en praktisk forståelse og et bilde av samfunnene rutene og fartøyene i Trondheims-sambandene faktisk binder sammen.

Under befaringen, og gjennom samtaler med mannskap ble følgende observert:

- Fartøyene; utforming, komfort og fasiliteter
- Tid som benyttes til og fra kai
- Tid brukt i marsjfart på distansen mellom anløpene
- Fartsområder med tanke på værforhold
- Kaianlegg

Bilder tatt under befaring i januar, innløp til Vanvikan t.v. og Trondheim t.h.



Figur 1 Bilder tatt under befaring, innløp til Vanvikan t.v. og Trondheim t.h.

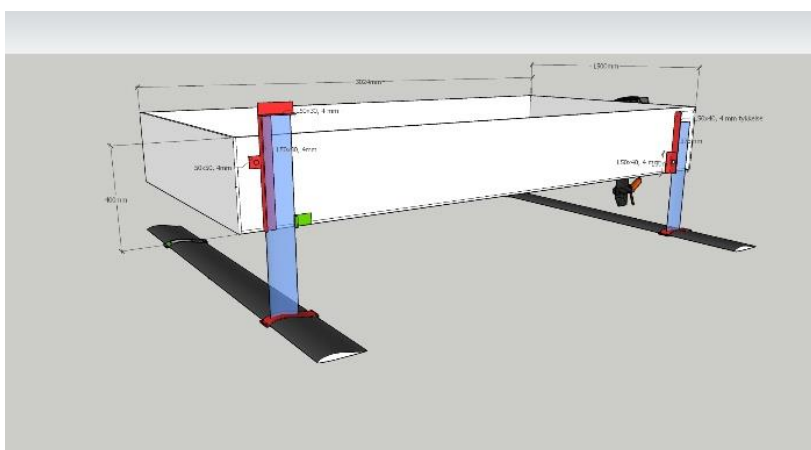
3.5 Numerisk analyse (CFD)

Under presentasjon i Trondheim i fjor, ble det stilt spørsmål fra ekspertpanelet om CFD-analyse skulle gjennomføres. Det har blitt vurdert å benytte CFD for å beregne krefter, og spesielt motstandskrefter. Muligheten for dette har blitt drøftet med ulike fagpersoner, men ettersom vårt foilkonsept bl.a. opererer med to medium, vann og luft (to-fase) ble det konkludert med at det på dette stadiet i prosjektet ikke kan gjennomføres en slik analyse. Eksperimentell testing er blitt utført for å skaffe input til CFD i neste fase, for eksempel foilenes geometri og deres innbyrdes påvirkning på hverandre. Konsortiet vil få gjennomført en CFD-analyse dersom prosjektet tas inn i en 3 fase, eller dersom prosjektet skal realiseres i full skala.

3.6 Eksperimentell testing

For å redusere energibehovet som er nødvendig for å frakte et fartøy fra A til B i høye hastigheter er det nødvendig å redusere våt flate. Vi har valgt å løfte fartøyet helt ut av vannet, og lagt et foilssett uten bevegelige deler til grunn for vårt foilkonsept. For å verifisere foilkonseptet er det utført eksperimentelle tester med modellbåter. Fjordene ble valgt som våre testbasseng ettersom testene krevde lange strekk i ulike hastigheter. Vi har selv sittet om bord i modellbåtene under testing. På denne måten ble både målinger og observasjoner gjort, samtidig som en også kunne føle på kroppen konseptets respons.

En enkel testrigg med 3 m lengde og 1,5 m bredde ble bygget for å verifisere dette foilkonseptet (proof of concept). Det er satt på en påhengsmotor for fremdrift. Denne testfarkosten kalles heretter testfarkost 1.



Figur 2 Skisse av testfarkost 1



Figur 3 Konstruksjon av testfarkost 1



Figur 4 Bilde etter første sjøsetting

Videre er det utviklet et sett med foiler som er montert på farkosten. Disse er laget i karbon, og innfestet med vertikale strutter i aluminium. Figur 5 viser vingeprofilen til testfoilene.



Figur 5 Vingeprofilen til testfoilene

Det er også utført tester med en aluminiumsbåt utstyrt med påhengt foilkonfigurasjon på baugen. Denne farkosten kalles heretter testfarkost 2.



Figur 6 Testfarkost 2

Testfarkost 1 ble brukt til å verifisere selve konseptet i sin helhet (proof of concept) og foilenes innvirkning på hverandre. Testfarkost 2 ble brukt til å utforske konseptet i større skala og slik foreta ytterligere målinger og verifisere skalering av foilkonseptet. Skalering av slike farkoster er ikke alltid lineære som tabell 1 viser. Tabellen er hentet fra Ray Vellingas «Hydrofoils Design Build Fly», 2009 s. 118. Under testene er det foretatt ulike manipulasjoner for å observere om dette gir forventet virkning. Bortsett fra manipulasjonene ble alle andre forhold holdt like (ceteris paribus). Mål med denne testingen var å finne løft og drag.

Tabell 1 Skalering av hydrofoiler

Model Size:	1/2 Scale	1/4 Scale	1/8 Scale	1/16 Scale
Linear Dimensions	1/2	1/4	1/8	1/16
Area	1/4	1/16	1/64	1/256
Volume and Weight	1/8	1/64	1/512	1/4096
Moments	1/16	1/256	1/4096	1/65536
Moments of Inertial	1/32	1/1024	1/32768	1/1048576
Wing Loading	1/2	1/4	1/8	1/16
Linear Velocity	1/1.14	1/2	1/2.83	1/4
Linear Acceleration	1	1	1	1
Angular Velocity	1.14	2	2.83	4
Angular Acceleration	2	4	8	16
R P M	1.14	2	2.83	4
Horsepower	1/11.3	1/128	1/1448	1/16384
Reynolds Number	1/2.83	1/8	1/22.6	1/64
Time	1/1.14	1/2	1/2.83	1/4

Figure 14-1. **Model scaling factors.** Data from Consolidated Aircraft Corp and edited by Martin Grimm, International Hydrofoil Society.

3.7 Design og modellering

Hele konseptet er under utvikling, og gjennom prosjektet har vi for både foiler, podder, skrog- og GA-design måtte gå til tegnebrettet flere ganger. Designprosessen har inkludert å gjennomføre beregninger, utarbeide skisser og tegninger (GA).

3.8 Teknologimodenhet

For å synliggjøre hvor langt konsortiet har kommet i å utvikle sitt konsept er det valgt å benytte skalaen Technological Level of Readiness (utviklet av NASA). Skalaen går fra 1 til 9, og viser hvordan en trinnvis beveger seg fra grunnleggende teknologiske undersøkelser (level 1) frem til en teknologi som er klar til å settes i drift (level 9). Hvor de ulike delene av konseptet ligger på skalaen er synliggjort i kapittel 6.

TRL	Description
1	Basic Research: basic principles are observed and reported
2	Applied Research: technology concept and/or application formulated
3	Critical function, proof of concept established
4	Laboratory testing of prototype component or process
5	Laboratory testing of integrated system
6	Prototype system verified
7	Integrated pilot system demonstrated
8	System incorporated in commercial design
9	System ready for full scale deployment

Figur 7 Technological Level of Readiness

4.2 Struktur

Det er utarbeidet 3 general arrangement, et GA for fartøy med kapasitet på 130 passasjerer, et for fartøy med kapasitet på 145 passasjerer og et for 195 passasjerer, se henholdsvis vedlegg 3, 4 og 5. Det er på disse tatt høyde for kravene til universell utforming.

Videre er plassering brenselceller og hydrogentanker gjort i tråd med risikomatrisen i vedlegg 2, og plassert på toppdekk for slik å høyne sikkerheten og ha færrest mulige sikkerhetssoner om bord. Plassering av batterier er også gjort i tråd med sikkerhetsmatrisen, slik at sikkerhet er ivarettatt for passasjerer og mannskap.

Skroget vil bygges i aluminium, som i dag kan fås som et lavkarbonprodukt. Dette er et av Hydros produkter og unikt i verdenssammenheng fordi det produseres vha. vannkraft. Ambisjonen om null-utslipp knytter seg derfor ikke bare til drift, men også til at hurtigbåten i seg selv er bygget med lavest mulig miljøbelastning. I dette ligger det også at hurtigbåtene skal kunne resirkuleres etter endt livsløp. Aluminium, i motsetning til GRP eller karbonfibre, er det eneste byggematerialet per i dag hvor resirkulering er mulig, og det kreves lite energi for å smelte det om. Dette gjør at 70 – 75 % av all aluminium produsert er gjenvunnet og fremdeles i omløp.

Ved et foildesign er fartøyets vekt avgjørende for at det skal kunne «fly». Valget av skrogmaterial vil gjøres med bakgrunn i dette, og en vil velge material med lav egenvekt. Skroget vil designes slik at det oppfyller gjeldende krav til stabilitet i HSC-koden og andre forskrifter. Videre vil skroget utformes med tanke på at en skal få en «myk landing» når en går ut av foilbåren modus, og at det skal være lett å manøvrere til og fra kai. Endelig skrogform vil være avhengig av resultater etter testing av foil-konsept som pågår, og vil være resultat av optimalisering av sjødyktighet, stabilitet, manøvrerbarhet, dødvekt, og regelverk.

Fartøyenes design skal sørge for minst mulig luft- og vannmotstand, og både aerodynamiske og hydrodynamiske prinsipper hensyntas. Undersiden har særlig betydning under take-off og landing, og skroget vil derfor ha beregnet styrke og design til å kunne skjære og dempe bølger.

4.3 Foil

4.3.1 Foildesign

Denne seksjonen er gjenstand for patentering. Konseptets virkemåte og design omtales derfor ikke. Foilene er utviklet av Lars Arne Bleie over flere år, og er del av et større system som sørger for at de regulerer seg selv som et styringssystem i alle sjøtilstander. Foilene er laget i karbon.

Det er bygget mange ulike typer foil-konfigurasjoner opp gjennom tidene. Felles for disse er ofte komplekse reguleringsystemer med bevegelige deler som krever svært mye vedlikehold. Dessuten er slike systemer svært tunge. De må bygges på innsiden av vertikale «struts» og langs med vingene og påvirker tverrsnittet på vingene slik at de skape mer motstand. Det må nødvendigvis også brukes sensorer og programstyring. Vårt konsept er foiler uten bevegelige deler. Fartøyets stabilitet og høyderegulering i foilbåren kondisjon reguleres av, hver og en, kjente prinsipp men er ikke kjent satt sammen slik før.



Figur 8 Tidlig modell og testfoilenes vingeprofil

Vingeprofilene bygger på kjente NACA profiler som brukes innen flyindustrien. Vi har videre brukt kunnskap og erfaringer fra konsortiet (Fjellstrand) i utformingen av struktur, profiler og strutter. Siden vi ikke har bevegelige deler har vi heller ingen mekaniske overføringer som følger innsiden på strutter eller foiler. Slik har vi redusert vingeprofilene til et minimum i tillegg til å oppnå vektreduksjon. Mekaniske overføringene og hydrauliske systemer veier gjerne like mye som et helt foilsett (karbonfiber).

4.3.2 Proof of concept

For å bevise at konseptet har et praktisk potensial, ble våre spesielle foiler utviklet og montert på testfarkosten, før den ble sjøsatt for eksperimentell testing. Allerede under første test-tur kunne vi konstatere at konseptet fungerer.



Figur 9 Første test - fløy på første forsøk



Figur 10 Klargjøring til test

4.3.3 Resultater etter testing

Det er gjort 5 test-sekvenser med testfarkost 1. Sekvensene er utført over flere uker. Følgende tester er utført:

Test 1: Test av løft og balanse; selvreguleringssystemet

Test 2: Test for å finne optimal fart og angrepsvinkel

Test 3: Test for å måle motstand i vingene

Test 4: Test av ulike design

Test 5: Video og verifikasjon av systemet («Proof of concept»)

Idet fartøyet kom ut av vannet og ble foilbåret, økte hastigheten betydelig og vi kunne redusere thrust på påhengsmotor betydelig samtidig som fart ble opprettholdt, fordi den våte flaten ble redusert. Dette underbygger hypotesen om at energibehovet reduseres ved bruk av vårt konsept. Med testfarkost 2 ble det gjort tester for skalering. Det ble gjort tester med ulik hastighet, for å finne løft i kg, drag i kg, løft/drag, foil-vinkel og foillast/m².



Figur 121 Fra første test



Figur 112 Fra andre test



Figur 13 Fra tredje test



Figur 14 Fra fjerde test

4.4 Fremdrift

4.4.1 Hydrogen som energibærer

Konsortiet har valgt hydrogen som energibærer med tilhørende brenselcelle som frigir dens energi og gjør den om til strøm, på sambandene Trondheim-Brekstad og Trondheim-Kristiansund. Hydrogen er en null-utslipps energibærer som kun slipper ut ren vanndamp. I gassform er den lett, men svært voluminøs og trenger derfor mye plass til lagring. I flytende form er den ikke like voluminøs, men lagring er fortsatt plasskrevende.

Det er vanskelig å få plass til nok lagringsplass om bord i en hurtigbåt til at en har hydrogenkapasitet til å gå en hel dag i rute. Lagringstanker er ikke bare plasskrevende, de er også tunge. På hurtigbåt ønsker en minst mulig vekt om bord, slik at en kan ha et så lavt energibehov som mulig. Men, med lett tilgjengelige fyllelokasjoner er det fullt *mulig* å bruke hydrogen som energibærer på hurtigbåt. Derfor har vi i vårt konsept lagt til grunn at det skal være fyllestasjoner på noen av anløpsstedene.

Hydrogen har et lavt flammepunkt, og eksplosjonsfare er et sentralt sikkerhetsaspekt som har gjort at det har vært skepsis til dens bruk som energibærer. I forhold til regelverk er det fortsatt uklarheter, men Sjøfartsdirektoratet har understreket at regelverket ikke skal være et hinder for utvikling, men tvert imot åpne for nytenking; Sjøfartsdirektoratet ønsker å hjelpe bransjen på vei. Det som imidlertid står sentralt for Sjøfartsdirektoratet i slik nytenking er at samme sikkerhetsnivå som på skip med konvensjonelle energibærere opprettholdes. Dermed er det opp til utviklere å gjennomføre risiko- og eksplosjonsanalyser blant annet for hvordan hydrogen lagres og fylles, for å sørge for at dette sikkerhetsnivået opprettholdes.

4.4.2 Lagring av hydrogen

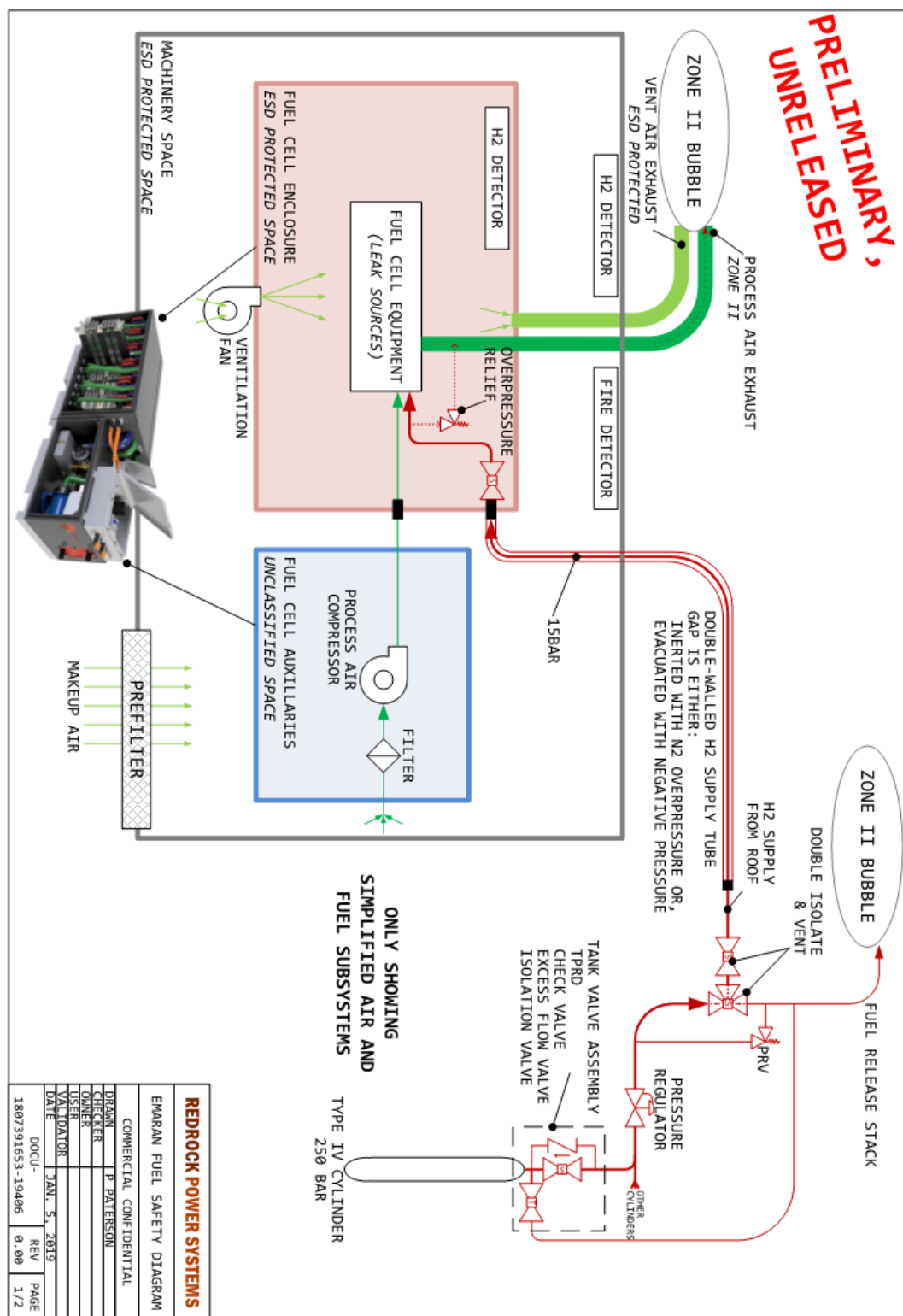
I vårt konsept har vi plassert alle komponenter som inneholder og bruker hydrogen på toppdekk. Det vil si både hydrogentanker og brenselceller. Dette er gjort i tråd med en risikovurdering i vedlegg 2, for å minimere skadeomfang ved en eventuell lekkasje / eksplosjon.

At brenselcellene også er plassert på toppdekk, gjør at en får korte rørstrekk, og færre sikkerhetssoner å definere, da installasjonen er helt skjermet fra passasjerområdene. I vårt konsept er det lagt til grunn at Magnum 3 tanker skal benyttes til lagring av hydrogen om bord.

4.4.3 Fylling og sikkerhet

I foil-konseptet er det lagt til grunn at flytende hydrogen benyttes. Denne har høyere energitetthet og går fortare å fylle enn komprimert hydrogen. Et viktig spørsmål for konseptet har vært hvordan fylling skal foregå på en sikker og effektiv måte. For å unngå rør i fartøyets side kan en ha fylleanordning

direkte til lagringstank. Et annet alternativ er å ha en kobling med slange i fartøyets side som fysisk frakobles lagringstanken etter gjennomført fylling. Endelig arrangementet avhenger av hvordan infrastruktur (tankanlegget) legges til rette på kaiene på fyllestedene.



Figur 135 Sikkerhetsdiagram for hydrogen

4.4.3 Brenselceller

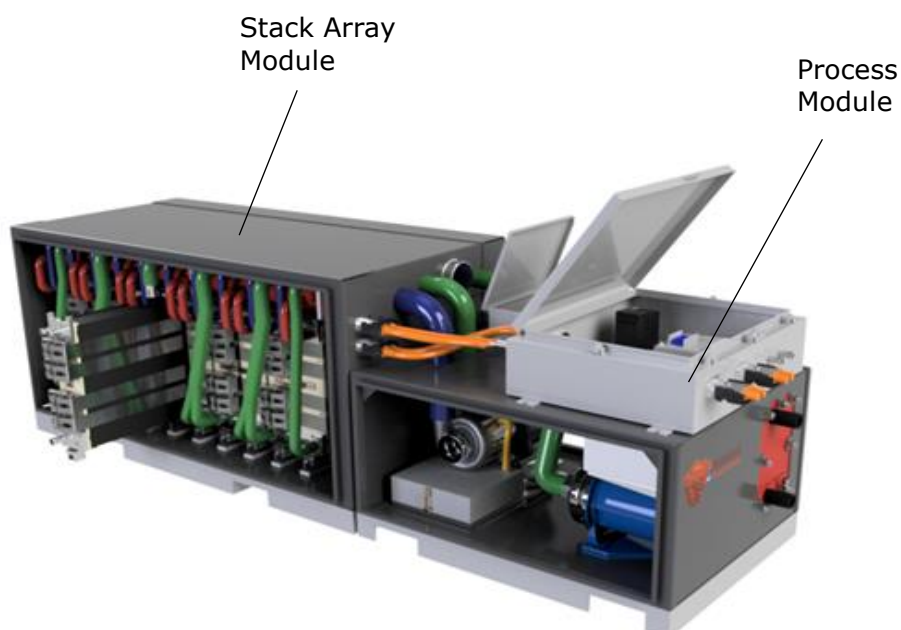
Brenselcellesystemet om bord på fartøyene i sambandene Trondheim-Kristiansund og Trondheim-Brekstad vil være todelt, et for styrbord og et for babord side, for slik å overholde krav om redundans. Hvert av systemene vil bestå av 500 kW resp 625 kW moduler, som automatisk vil legge seg inn eller ut av systemet basert på energibehov.

Brenselcellesystemet på alle fartøy vil bestå av en seksjon plassert på toppdekk og en maskineriseksjon plassert under dekk. Alt som inneholder hydrogen vil være plassert i seksjonen på toppdekk. Denne seksjonen består videre av så få komponenter som mulig grunnet hensyn til størrelse, vekt og stabilitet. Hovedsakelig består det av brenselcellene og undersystemer for hydrogen resirkulering. Et system med hydrogen og brenselcelle må ha en batteripakke som en del av styringsenheten. Denne batteripakken lades ved hjelp av overskuddsstrøm fra brenselcellen.

Brenselcellesystemet som ligger til grunn for konseptet kalles RR 4, og tilpasses det enkelte fartøy. Det er ikke et system konvertert fra bruk i buss/bil, men designet spesielt for maritimt bruk.

Tabell 3 Spesifikasjoner for brenselceller

Spesifikasjoner RR-4	
Max power	500 / 625 / 750 kW versions
Min power	60 kW
Efficiency	~54 % LHV
Weight	
- Configuration on top deck	760 / 950 / 1140 kg (depends on version)
- Configuration below deck	350 kg



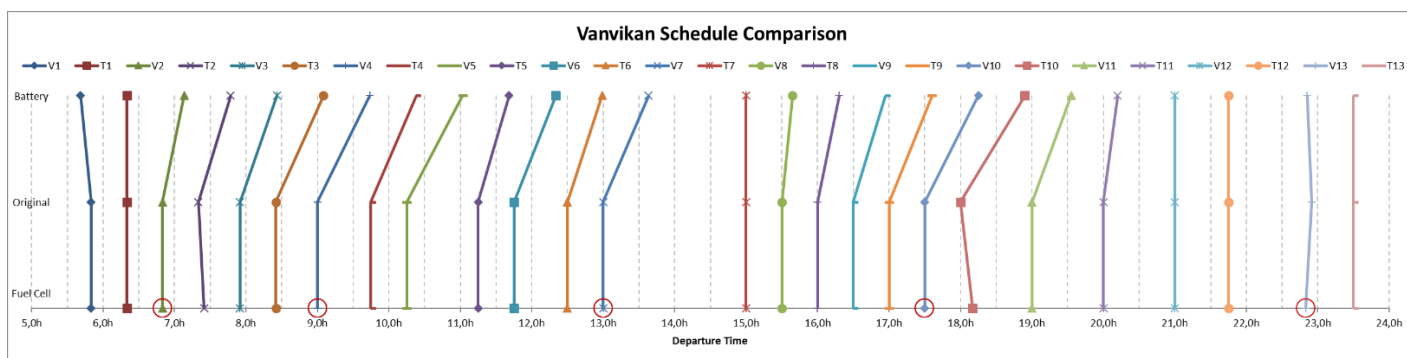
4.4.4 Batteri som energibærer

Til fartøyet på Vanvikan er LTO batteri presentert som energibærer i vårt løsningsforslag. Med LTO batterier vil ytelse og energitetthet være optimalisert, og ladetid minimert. Liten størrelse og lav vekt på batteriene gjør at dette er et svært godt alternativ til hydrogen på dette sambandet. Lav egenvekt gjør at en fortsatt kan oppnå energireduksjon, sett i forhold til konvensjonell MGO-drift.

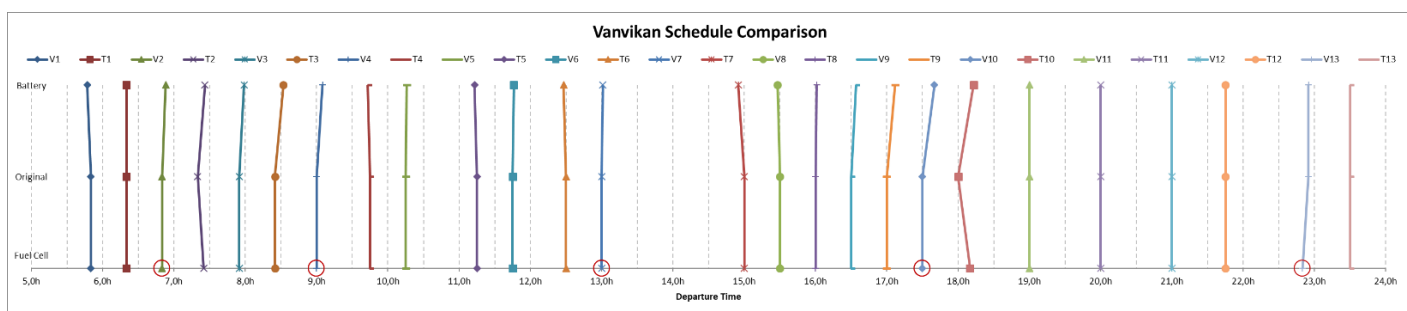
Batteriet kan tappes ned til 0 % uten å ta skade av det eller at det går utover dets levetid. I 2023 kommer en ny generasjon LTO-batterier i serieproduksjon, som har 30 % høyere energitetthet sammenlignet med dagens generasjon. Batteriene vil dermed ha en 30 % lavere vekt enn det som finnes i dagens marked.

Echandia Marine kan allerede i 2020 levere LTO-batterimoduler med kapasitet til å lade i og ut av en effekt tilsvarende 6 C. Disse vil være basert på eksisterende celletyper, men på grunn av annen modulkonfigurasjon og bedre kjøleegenskaper har de en bedre effekt sammenlignet med dagens begrensning på 3,5 C.

Forskjellen mellom charge-rate er illustrert i rutetabellen for Vanvikan-sambandet nedenfor. Ved bruk av LTO-batterier med 3,5 C får man for lange liggetider på grunn av lading og rutetabellen forskyves utover dagen. Ved bruk av batterier med ladekapasitet på 6C kan dagens rutetabell opprettholdes. I tabellen er dagens rutetider oppgitt, og sammenlignet med ladetid for batterier og fylletid dersom en hadde valgt å benytte brenselceller også på dette sambandet.



Figur 16 3,5C battery recharge capacity vs. original vs. fuelcell option



Figur 17 6C battery recharge capacity vs. original vs. fuelcell option

Redundans sikres gjennom en batteripakke med tilstrekkelig kapasitet til at fartøyet kan komme seg til havn med lav fart.

4.4.5 Podder med integrert el-motor og propulsjon -

Fremdriftssystemet vil bestå av to podder som begge har integrerte elektromotorer. Poddene vil ha to propeller, en skyvende og en dragende, som alle vil ha svært høy virkningsgrad. I hver pod er det to adskilte elektromotorer som driver respektive propeller. For hvert fartøy er det derfor 4 elektromotorer som integreres i forbindelse med foilen.



Figur 18 Podder integrert i forbindelse med foil

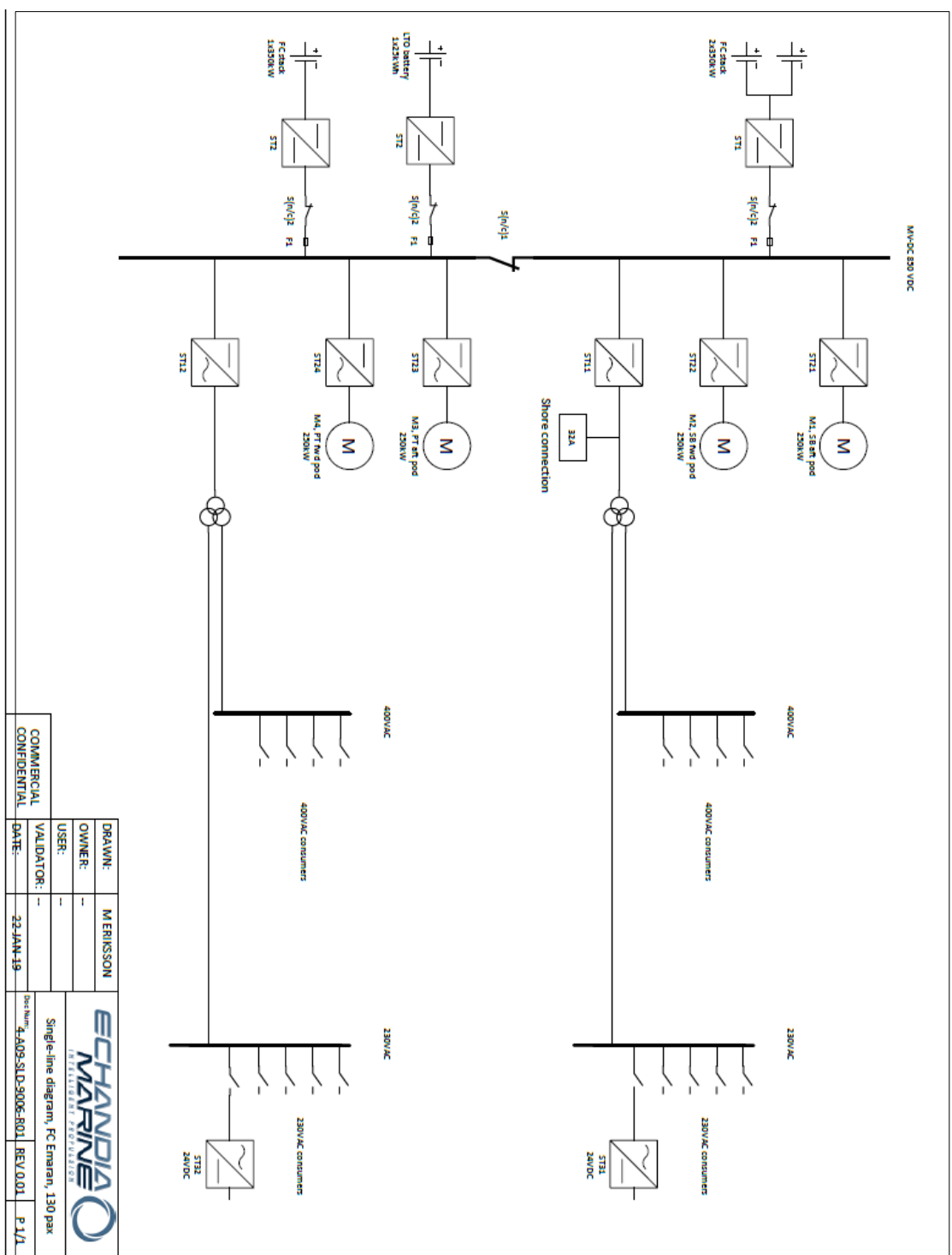
Echandia Marine AS har en pågående prosess med å utvikle og designe podder med integrerte elektromotorer for fremdrift og har et flertall podder av lignende type i drift på fartøy i Sverige. I prosessen utføres beregninger og analyser for å verifisere om disse kan innlemmes i foiler. Med et kontraroterende propellarrangement bedømmes propellvirkningsgraden til å kunne økes med opptil 5 % ytterligere sammenlignet med en konfigurasjon med en propell.

Tabell 4 viser preliminnære propelldata.

[illegible]

4.4.6 Energioverføring

Brenselcellene må ha en grunnbelastning ved oppstart/tomgang for å kunne øke dynamikk og respons, samt øke virkningsgraden. Brenselcellene vil derfor være parallelt innkoblet med en mindre batteripakke for å sørge for el-kraft når fartøyet går på tomgang. Figur XX viser enlinje-skjema over sammensetningen.



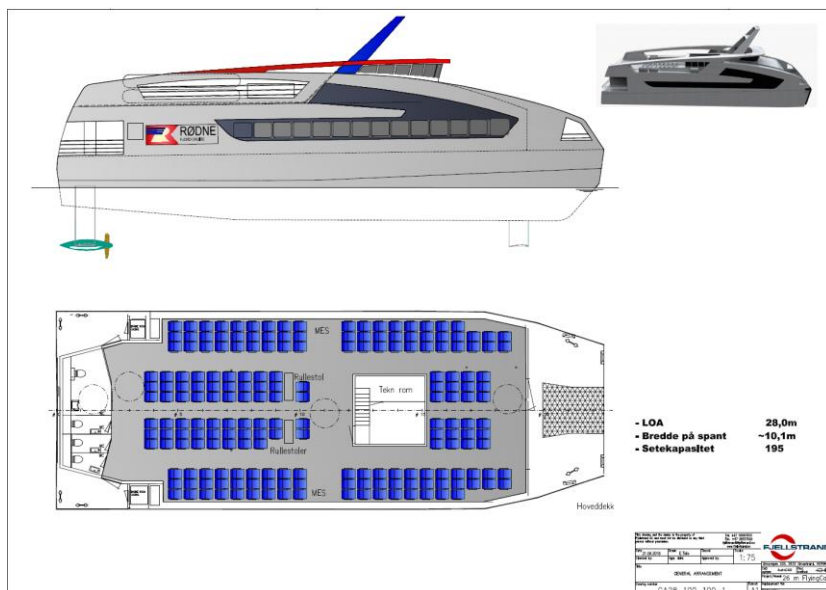
Figur 19 Enlinjeskjema fremdriftskonfigurasjon

4.4.7 Styring

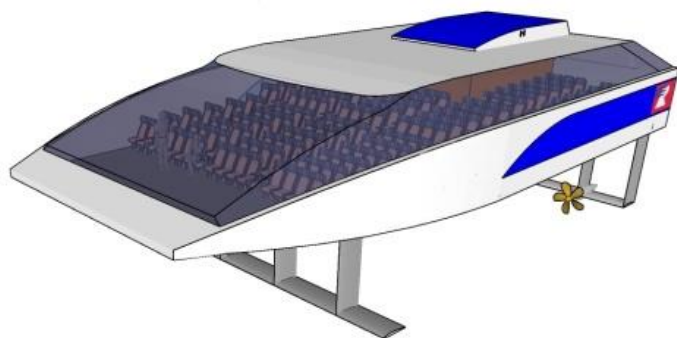
For å minimere risiko i prosjektet er tradisjonelle ror designet for høye hastigheter. Rorbladene lages i karbonfiber for å minimere vekt, ettersom spennvidden på rorbladet blir relativt lang på fartøyene med foil. Videre vil alle fartøyene ha thrustere integrert i skrogene til hjelp ved manøvrering.

4.5 Design

Ved et oppdrag om å utvikle ny teknologi spiller også design en vesentlig rolle. Innad i konsortiet sitter en industridesigner, i tillegg til ingeniører som har laget båter ihht. regelverk i en årrekke. Dette medfører at en får to vidt forskjellige innfallsvinkler når utseendet til fartøyet diskuteres. Dette ser en tydelig på figur 20 og 21, som er tegnet av henholdsvis Fjellstrand AS og Lars Arne Bleie.



Figur 20 GA laget av Fjellstrand AS



Figur 21 Fartøy tegnet av Lars Arne Bleie

Det er ingen tvil om at det enkleste vil være å bygge et fartøy bygget på GA utviklet av Fjellstrand AS, med tanke på oppfyllelse av gjeldende krav. Samtidig skal en ikke undervurdere det fartøyet som er tegnet av Bleie, som kan være et sunt bidrag til å se på gjeldende regelverk med nye øyne. Har en buss som går i rute som tar 20 minutter krav til 2 toaletter om bord, slik det er på fartøyet som går i rute mellom Trondheim og Vanvikan? Er midtganger, seter og avstand mellom seter som du finner om bord i fly av samme dimensjon som det som kreves på hurtigbåt? I en slik anledning som dette utviklingsprosjektet er, kunne det vært en tanke å se på nettopp slike krav som er gjeldende, og sammenligne med de som foreligger for andre transportmidler? Kan det å fire på slike krav og inngå kompromiss, være en viktig bidragsyter til at en oppnår målet om null-utslipp, også på hurtigbåt?

5. Operasjon

5.1 Økonomi

5.1.1 CAPEX

Konsortiet har som utgangspunkt en forventning om CAPEX på noenlunde samme nivå som hurtigbåter med konvensjonell fremdrift. Fartøyene med foilkonsept er likevel forventet å få høyere CAPEX da det ikke har vært bygget fartøy med denne teknologisammensetningen tidligere. Tabell 5 viser våre beregninger for CAPEX for de 5 fartøyene. I beregningene har vi trukket fra kostnader til tradisjonelle fremdriftssystemer, og lagt til kostnader for komplette elektriske propulsjons- og energisystemer, og foiler.

Tabell 5 CAPEX fartøy

5.1.2 OPEX

Tabell 6 viser våre beregninger for årlige OPEX for de 5 fartøyene. Beregningene er basert på en gjennomgang av dagens rutetabell og Rødnes erfaringer med drift av tilsvarende ruter. I tillegg ligger forventninger fra utstyrsleverandører om levetid, og vedlikehold av den nyutviklede teknologien til grunn. Vedlikeholdskostnader forventes å reduseres betydelig sammenlignet med konvensjonelle fartøy, ettersom de ikke har dieselmotor. Foilene anses som vedlikeholdsfrie ettersom de ikke har bevegelige deler. Dette er noen av de store økonomiske gevinstene ved vårt konsept. I beregningene er både energikostnader og lønnskostnader inkludert.

Tabell 6 OPEX fartøy

5.2 Operasjoner og brukervennlighet

Brukervennlighet for passasjerer:

For passasjerer skal en med utgangspunkt i General Arrangementet hvor alle passasjerer er plassert på ett dekk, ikke merke forskjell på komfort sammenlignet med fartøyene som opererer rutene i dag. Salongen er universelt utformet med en gjennomgående høy komfort, med store vinduer, god ventilasjon, samt god logistikk. Fartøyet må etter nærmere diskusjon med oppdragsgiver og krav til passasjerfasiliteter justeres i forhold til eventuelle anbudskrav (bagasje, sittegrupper, kiosk, plass til sykkel osv.).

Videre skal det selvregulerende foilsystemet sørge for at en får dynamisk og rolig regulering i sjø, og dermed en svært behagelig overfart for de reisende.

Ettersom det blir nødvendig å gjennomføre fylling av hydrogen på sambandet Trondheim – Kristiansund underveis i ruten, er det i vårt løsningsforslag lagt opp til at passasjerene bytter båt på Edøy eller Brekstad. Dette vil for passasjerene, være den eneste merkbare konsekvensen ved å bruke vårt konsept på dette sambandet. Korrespondanseløsningen gjøres for å unngå at passasjerene må vente på at fartøyet fyller hydrogen, opprettholde dagens reisetid, og unngå å ha passasjerer om bord i fartøyet ved fylling.

Brukervennlighet for rederi og mannskap:

At fartøyet og dets systemer er brukervennlig er også svært viktig for mannskapet og operatør, slik at sambandet driftes forsvarlig og forutsigbart. Brukervennlighet har derfor vært et viktig aspekt under utviklingen av konsept og fartøy.

Manøvreringsevne, spesielt til og fra kai, men også styring underveis, inngår i dette aspektet. På fartøyene med foil-konsept vil det være to podder integrert i forbindelse med den akterste foilen, en i hver side, for å sikre fremdrift, god manøvreringsevne og mulighet for å «sakse» i deplasement-modus. Også på batterifartøyet vil poddene plasseres slik at fremdrift, manøvreringsevne og «sakse»-mulighet er ivaretatt.

Kontroll- og nødsystemer med hensyn til operasjonell sikkerhet ivaretas ved å ha redundans i batteri-, hydrogen- og brenselcellesystemene, samt i pod- og styringssystemer. Dette, sammen med nødsystemer for ankring, mann-over-bord situasjoner og vanninntrengning ivaretar operasjonell sikkerhet.

Behovet for forutsigbarhet og driftssikkerhet for fartøyenes operatør ivaretas ved at foilene ikke har bevegelige deler, og dermed minimalt behov for vedlikehold. Videre krever både batteri og podder med integrerte elektromotorer lite vedlikehold og er ansett som svært driftssikre. Hydrogen- og brenselcellesystemer er nytt på hurtigbåt. Det må erfaring til for å kunne si noe om de forventede vedlikeholdskostnader til en slik konfigurasjon.

5.3 Mannskapsbehov og forventninger

Sett fra et rederiperspektiv, medfører det å gjøre et grønt skifte og gå over til et null-utslipps konsept, spørsmål om mannskap og kvalifikasjoner. Systemer med brenselceller og hydrogen er noe helt annet enn det konvensjonelle MGO-fremdriftssystemet. Likeså er foilbårne fartøy noe helt annet enn konvensjonelle skrogbårne fartøy. Et skifte vil, sannsynligvis, medføre ekstra kostnader til kursing og opplæring av mannskap.

Et annet spørsmål å ta stilling til for reder er sikkerhetsaspektet ved å benytte alternative energibærere, og om en får mannskap til å arbeide om bord. Hydrogen bærer med seg kjente risikoer, som medfører en generell skepsis. Dette er tatt med i betraktning under prosjektet, og hensyntatt i risikomatrise i vedlegg 2.

6. Diskusjon

6.1 Hvorfor velge vårt løsningsforslag?

Først og fremst fordi vårt konsept er helt utslippsfritt, og er utarbeidet med kunden i fokus. Vårt løsningsforslag tar med andre ord både det teknologiske og kommersielle perspektivet i betraktning. Løsningsforslaget innfrir ikke bare fylkeskommunens ønske om null-utslipp, men har også et høyt nivå av brukervennlighet og komfort.

Ved å benytte selvreguleringsteknikk på foilene løftes hydrofoilkonseptet til et nytt nivå; kompleksiteten forbundet med foildesign er fjernet. De fleste eksisterende hydrofoilkonsepter er basert på overflatefoiler (unntatt noen få utviklingsprosjekter med neddykkede foiler, f.eks. FoilCat levert av Fjellstrand). Med våre neddykkede foiler er ikke fartøy og vinger i kontakt med bølgene. Dette gir maksimal komfort for passasjerene, i tillegg til et betraktelig lavere energibehov for å frakte fartøyet fra A til B. Til sammenligning har fartøy med neddykkede foiler som er i bruk i dag avanserte styrings- balanse- og fremdriftssystemer med bruk av bevegelige deler som krever mye vedlikehold.

S kroget vil bygges i aluminium, som kan gjenvinnes og brukes på nytt ved endt livsløp, uten bruk av mye energi. Fra et miljømessig perspektiv, er dette et stort pluss med våre konsept. Passasjersalongens utforming er laget med tanke på at det skal være god utsikt, og generelt høy komfort.

Økt driftssikkerhet og minimalt vedlikehold vil sørge for å opprettholde rutenes regularitet og effektivitet. Å gå ned i passasjerkapasitet på de største fartøyene, og i stedet opprettholde dagens totale passasjerkapasitet per dag, får en økt frekvens og et mer effektivt samband. På denne måten oppnås en kommersiell fordel som vil øke antall reisende på ruten, og fartøyene fylles. Fartøy med størrelse tilpasset passasjermengden gir også en miljøgevinst i form av at mindre energi benyttes, mens en likevel kan møte kapasitetsbehovet på store utfartsdager ved å ha et ekstra fartøy. Videre gir sambandets totale fleksibilitet mulighet for å ta ekstra oppdrag, slik som dagens operatør har med reservefartøyet Ladejarl.

6.2 Hvilke konsekvenser vil en få ved å sette konseptet i tjenestebruk?

Vårt løsningsforslag innebærer noen justeringer i rutetabell sammenlignet med dagens ruter. Årsaken til dette er at fartøyene som trafikkerer dette sambandet skal gå på hydrogen, og fylling underveis er nødvendig. Derfor settes et ekstra fartøy inn i sambandet mellom Kristiansund og Trondheim, slik at passasjerene i stedet for å vente på at fartøyet fyller, bytter båt enten på Edøy eller Brekstad. På tur fra Kristiansund til Trondheim vil passasjerene måtte bytte båt på Brekstad, motsatt vei vil de måtte bytte

båt på Edøy. Justeringer må derfor gjøres i rutetabell, slik at anløpstidspunkter mellom korresponderende båter sammenfaller. Denne ordningen løser også sikkerhetsspørsmålet omkring å ha passasjerer om bord under fylling av hydrogen.

På sambandet mellom Trondheim og Vanvikan vil en også måtte gjøre noen små tilpasninger i rutetabellen, da fartøyet vil trenge en ladetid på 8 minutter på hvert stopp. Reisetiden vil imidlertid ikke endres.

6.3 Hvilke tilrettelegginger må gjøres på land for at en skal kunne sette konseptet inn i tjenestebruk?

Et sikkert, enkelt og effektivt system for fylling av hydrogen / lading av batterier er viktig for drift av vårt konsept. At tilgang på hydrogen / lading finnes på de angitte kaier, og at overføring av hydrogen fra landanlegg til fartøy kan gjøres på en forsvarlig måte, er dermed avgjørende. Det må derfor gjøres noen tilrettelegginger på land:

- Det må tillages fyllestasjoner på Edøy og Brekstad slik at fartøyene i sambandet mellom Trondheim og Kristiansund kan fylle hydrogen
- Ved fyllestasjonene må det etableres passende sikkerhetstiltak
- Det må etableres et distribusjonssystem av hydrogen, slik at en vet at en alltid vil ha hydrogen tilgjengelig
- På begge kaier i sambandet Trondheim-Vanvikan må det tilrettelegges med infrastruktur for lading

6.4 Teknologimodenhet – technological level of readiness?

Vi har stor tro på vårt konsept, og har i løpet av dette prosjektet fått bevist at det er mulig å lage null-utslipps hurtigbåter. Teknologi til å produsere de komponenter konseptene består av, finnes; det lages både brenselceller, hydrogentanker, foiler og podder. Det er likevel flere brikker som må på plass, før hele puslespillet med en utslippsfri hurtigbåt er komplett. Foilkonseptet må optimaliseres, og poddene med integrerte elektromotorer må videreutvikles. Videre må poddenes integrasjon i forbindelse med foilene optimaliseres. Formelt sett må også en preliminær godkjenning, og det arbeid det medfører, på plass før en kan gå videre og få en endelig godkjenning fra Sjøfartsdirektoratet til å sette konseptet i kommersiell drift. Dette vil koste tid og penger, men konsortiet er overbevist om at det ville vært en god investering.

På skalaen om technological level of readiness, kan man på nivå 9 teste, lansere og operere teknologien. Konsortiet når ikke helt til topps på skalaen i dag, men har landet på et akseptabelt nivå,

der deler av teknologien kan demonstreres (nivå 3). For å nå toppen, vil en måtte videreutvikle systemene og undersystemene ytterligere.

Tabell 7 Konseptets Technological Level of Readiness

Komponent	Technological level of readiness
Foil	3
Brenselcelle	3
LTO-Batterier	9
Podder	3
Konseptet som helhet	3

7. Konklusjon

Gjennom arbeidsprosessen med dette spennende prosjektet har konsortiet fått et større innblikk i de gjeldende regelverk og hvilke steg som er nødvendige for å få en endelig godkjenning til å sette et fartøy med ny teknologi i drift. Videre har vi, gjennom eksperimentell testing, beregninger og modellering funnet svar på vår problemstilling:

Er det mulig å gjøre hurtigbåtrutene i Trondheim utslippsfrie? Eventuelt når?

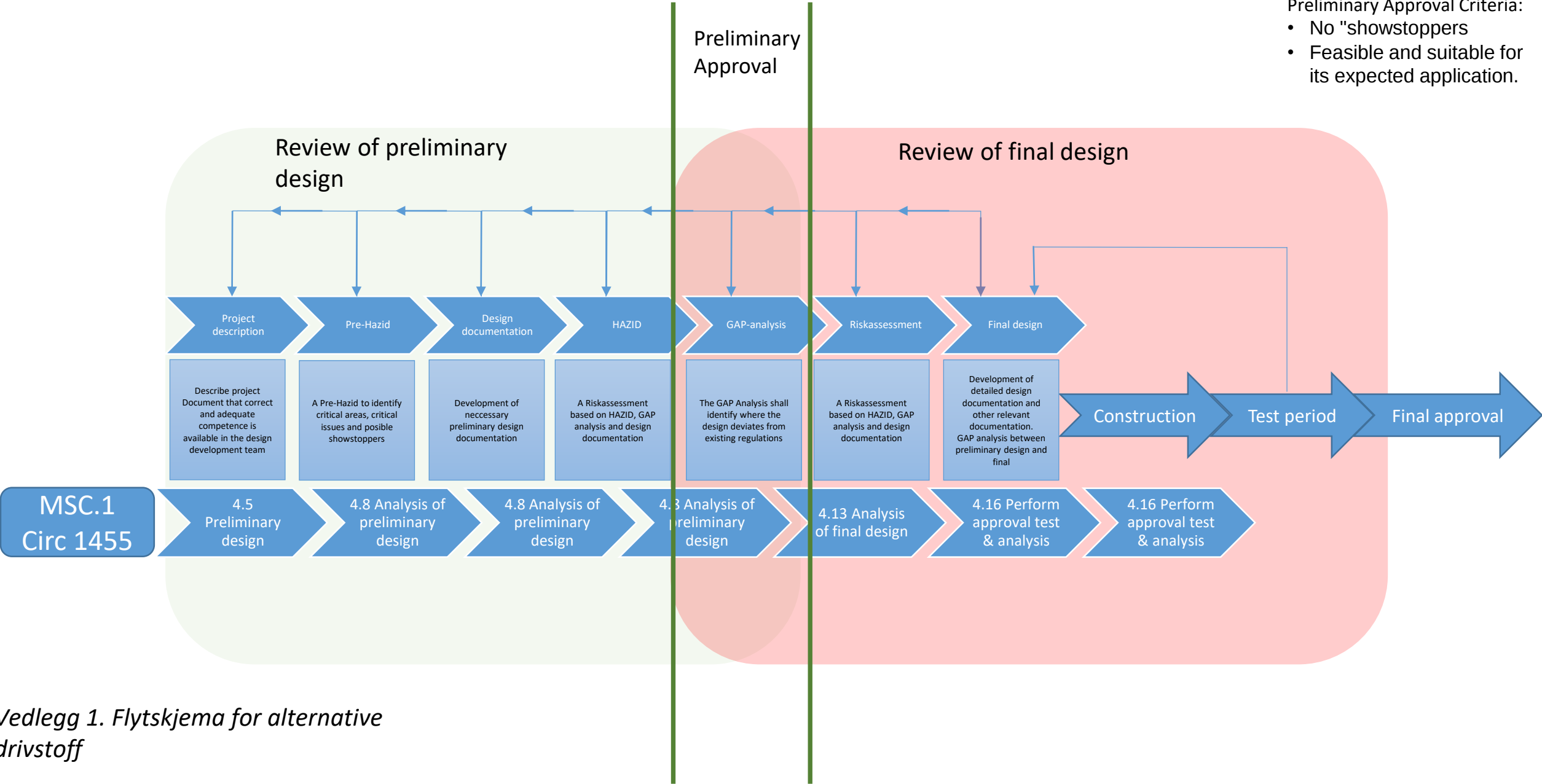
Vår konklusjon er at ja, dette er mulig.

Det er imidlertid flere steg som er nødvendige å ta, før konseptet er modent for å settes inn i kommersiell tjeneste. En formell utviklingsprosess i samarbeid med Sjøfartsdirektoratet må gjennomføres, for å sikre en endelig godkjenning. I tillegg må flere beregninger og eksperimentelle tester gjennomføres. Dette er tidkrevende, og et realistisk tidsperspektiv tilsier at vårt nullutslipps-konsept kan være klart til 2022-2023.

Videre er det en foreløpig anbefaling fra konsortiet at Trøndelag Fylkeskommune og samarbeidspartnere, vurderer å videreføre denne konkurransen til en tredje fase, hvor noen av konsortiene velges ut til å gå videre med sine konsept, og skaffer preliminær og endelig godkjenning av Sjøfartsdirektoratet. Eventuelt at alle konsortier går videre og samarbeider seg imellom for sammen å utvikle den beste teknologien basert på de løsninger som er funnet til nå.

Process for alternative fuels or systems

- Preliminary Approval Criteria:
- No "showstoppers"
 - Feasible and suitable for its expected application.



Vedlegg 1. Flytskjema for alternative drivstoff

Alvorlighet		Sannsynlighet		
Nivå	Beskrivelse	Nivå	Beskrivelse	Definisjon
1	Totalt	A	Usannsynlig	Usannsynlig at det noen gang skjer
2	Svært alvorlig	B	Liten sannsynlighet	Usannsynlig at skjer i prosjektet
3	Alvorlig	C	Nå og da	Sannsynlig å oppstå under prosjektet
4	Mindre alvorlig	D	Sannsynlig	Kan oppstå flere ganger
5	Ubetydelig	E	Hyppig	Vil ofte oppstå

Usikkerhetsforhold #	Usikkerhetsbeskrivelse	Konsekvens	Prosjekt styringsreaksjon	Løsning/kommentar	Alvorlighet nivå	Sannsynlighet nivå	Risiko	Sannsynlighetsfaktor
1	Foilens stabiliseringssystem på luft fungerer ikke på modell	Det virker ikke på et virkelig fartøy		Teste med modell	1	A	L/M	1
2	Nødvendig størrelse på foil er usikker	Foil kan bli veldig bred		Gjøre flere beregninger	3	A	L	1
3	Luftprinsippet for foil kan være følsomt	Dersom det er veldig følsomt kan fartøyet ofte dette nedpå under operasjon		Teste med modell. Gjøre skaleringsberegninger.	2	C	M	3
4	Hva om luftinntaket plutselig blokkeres? F. eks av is, groe	Fartøyet kan ikke fly		Varmekabler?	5	B	L	2
5	Fartøyets stabilitet når det flyr, f. eks ved , rulling, mange passasjerer i en side, kraftig sidevind	Fartøyet kan dette nedpå, kan bli mye bevegelse som kan oppleves ubehagelig. Konsekvenser ifht regelverk		Teste med modell. Lage vinkel på hver ende av foil.	3	B	L	2
6	Kavitasjon, vibrasjon	Ubehagelig å oppholde seg om bord. Overskride krav om støy nivå		Design og materialvalg. Plassering av podder	2	C	M	3
7	Det finnes ikke regler hos Sjøfartsdirektoratet for hydrogendrift	Kan møte uventede krav underveis. Prosjektet kan stanses. Økte kostnader, økt vekt på fartøy.		Starte prosessen mot direktoratet tidlig. Ha med rikelig fagkompetanse.	3	C	M	3
8	DSB har ikke / har få regler for batteridrift	Prosjektet kan forsinkes		Informere og innlemme i gruppe med Sjøfartsdirektoratet.	3	B	L	2
9	Fartøyet kan få høy vekt på grunn av de ulike komponentene, som propell, hydrogen-/batterianlegg	Tap av fart, større energibehov			4	A	L	1
10	Noen steder er sellingsleden og moloer smale	Foilen og fartøyet kan være for bredt til å kunne operere ruten		Ta ekstra hensyn til bredde i designfase, gjøre gode beregninger for foildimensjonering	4	B	L	2
11	Hydrogeninstallasjonens plassering gjør at den utsettes for ulike værforhold	Ekspljosjonfare f. eks på varme dager		Kjøleanlegg, materialvalg	2	B	M	2
12	Hydrogeninstallasjonen vil være sårbar dersom en får "pressure release"	Brann og eksplosjonsfare		Foreta risikoanalyse for hvor sannsynlig det er at dette kan oppstå. Utendørs på toppdekk, vil bevege seg oppover bort fra båt	2	B	M	2
13	Krav om redundans for avgjørende systemer	Større anlegg, som gir større vekt		Innlemme i design og konfigurasjon av alle systemer	3	B	L	2
14	Mannskapets kunnskap om hydrogen og batteri	Feilbruk, feilbedømming av nødvendige sikkerhetstiltak		Kursing, opplæring	3	C	M	3
15	Anleggets størrelse i forhold til energibehov	For stort eller for lite dimensjonert system for energi		Gjennomføre flere og nøyaktige beregninger for å sikre at en har tilstrekkelig effekt i forhold til energibehov, med sikkerhetsmargin, men ikke mer	2	C	M	3
16	Bunkring av hydrogen kan være risikofyllt dersom lekkasje	Ekspljosjonfare		Sikkerhetssone. Design av system.	1	B	M	2
17	Definisjon av sikkerhetssone - sonen kan bli stor	Konsekvenser for drift, bunkringssteder kan bli lagt lenger fra anløpskaiene. Konsekvenser for effektivitet og avvikling av rute		Starte prosessen mot myndigheter tidlig. Ha med rikelig fagkompetanse. Design av system.	3	C	M	3
18	Gasslekkasje ved vedlikehold	Skade på mannskap, eksplosjonsfare, brannfare		Sørge for mest mulig vedlikeholdsfrie systemer. Foreta risikovurderinger, utarbeide prosedyrer. Vedlikehold av hydrogensystemer utføres kun av autorisert personell. Besetning skal kun ha visuell kontroll av anlegget.	1	B	M	2
19	Endringer i regelverk under prosessen	Høyere pris, utfordringer i design og konstruksjon		Starte prosessen mot myndigheter tidlig. Ha med rikelig fagkompetanse	4	C	L	3
20	Batteriets evne til å gi nødvendig effekt	Klarer ikke å oppfylle rutekravene		Flere beregninger, og mer dokumentasjon fra batterifabrikken fremskaffes. Batteripakken kan utvides (flere batterier) til å tåle utladingen. Batterikontroll system som styrer utlading på enkeltcelle nivå, for maksimal utnyttelse av batterier uten skade.	1	A	L/M	1
21	Batteriets evne til å motta effekt	Klarer ikke å oppfylle rutekravene		Flere beregninger , og mer dokumentasjon fra batterifabrikken fremskaffes. Batteripakken kan utvides (flere batterier) til å tåle effekten. Batterikontroll system som styrer lading på enkeltcelle nivå, for hurtiglading.	2	B	M	2

Nivå	Sannsynlighet	
A	Usannsynlig	1
B	Liten sannsynlighet	2
C	Nå og da	3
D	Sannsynlig	4
E	Hyppig	5

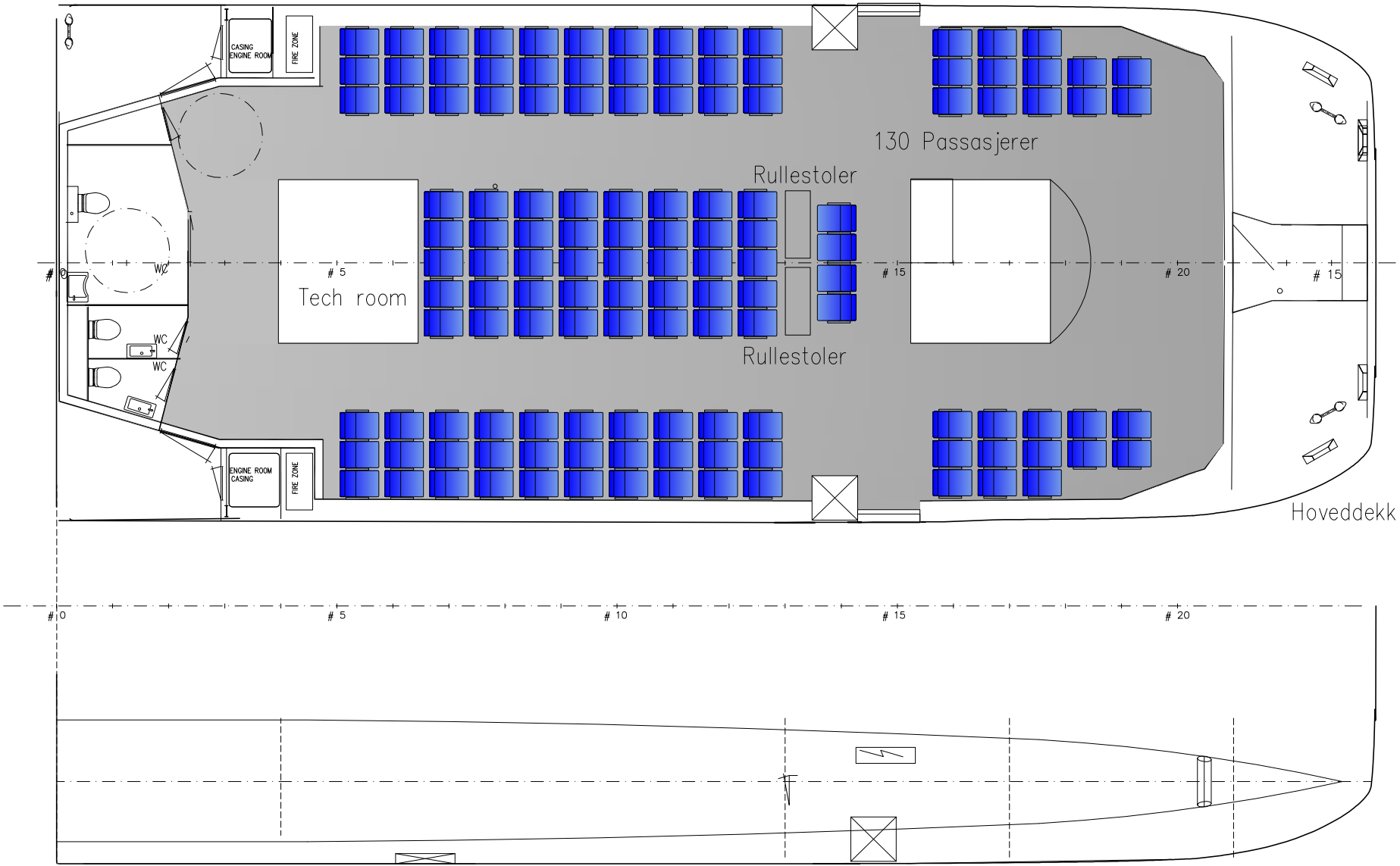
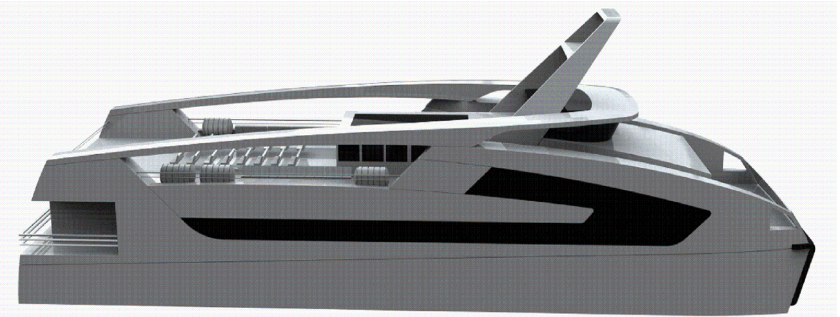
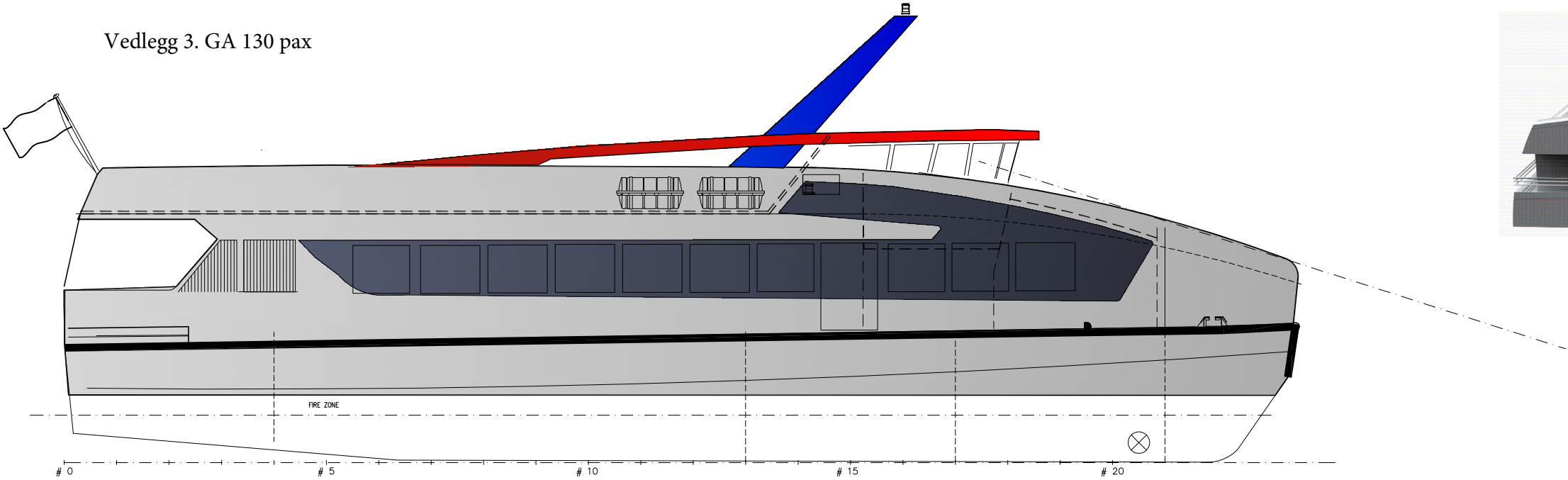
Forkortelser
L - Liten
M - Middels
H - Høy

	A	B	C	D	E
1	L/M	M	H	H	H
2	L	M	M	H	H

Usikkerhetsforhold #	Usikkerhetsbeskrivelse	Konsekvens	Prosjekt styringsreaksjon	Løsning/kommentar	Alvorlighet nivå	Sannsynlighet nivå	Risiko		Sannsynlighetsfaktor
22	Batteriets sikkerhet mot brann/ selvantennelse	Brann		Systemgjennomgang med batterileverandør, samt dokumentasjon av kjemisk sammensetning av batteri. I tillegg til system for aktiv og passiv brannbekjempelse. Batterikontroll system som kontrollerer hvert enkelt batteri ned til cellenivå m.h.t lading,	1	B	M		2
23	Batteriets sikkerhet mot gassutvikling	Brannfare/ fare for personell.		Systemgjennomgang med batterileverandør, samt dokumentasjon av kjemisk sammensetning av batteri. I tillegg til system for aktiv og passiv brannbekjempelse. Batterikontroll system som kontrollerer hvert enkelt batteri ned til cellenivå m.h.t lading,	1	B	M		2
24	Bunkring av hydrogen kan ta lang tid	Konsekvenser for ruteplan dersom en må fylle underveis, spesielt dersom fylling må skje uten passasjerer om bord - kan bli en mindre "effektiv" rute		Flere beregninger på hvor mye hydrogen en kan ha om bord. Utvikle smarte fylleløsninger som krever lite tid. Justere ruteplan	3	C	M		3
25	Manøvreringsevne og effekt	Ikke komme til kai i dårlig vær		Flere og gode beregninger for å sørge for at fartøyet får tilstrekkelig manøverkraft	3	B	L		2
26	Innfestning av ror er vanskelig ved foildesign	Kan få mindre effektiv styring og manøvrering, kan få sprekker og vibrasjoner		Design. Installere bugthrustere i skrog	2	B	M		2
27	Propellens virkningsgrad	Bruke unødvendig mengde energi		Beregninger og design	3	B	L		2

3	L	L	M	M	H
4	L	L	L	M	M
5	L	L	L	L	L/M

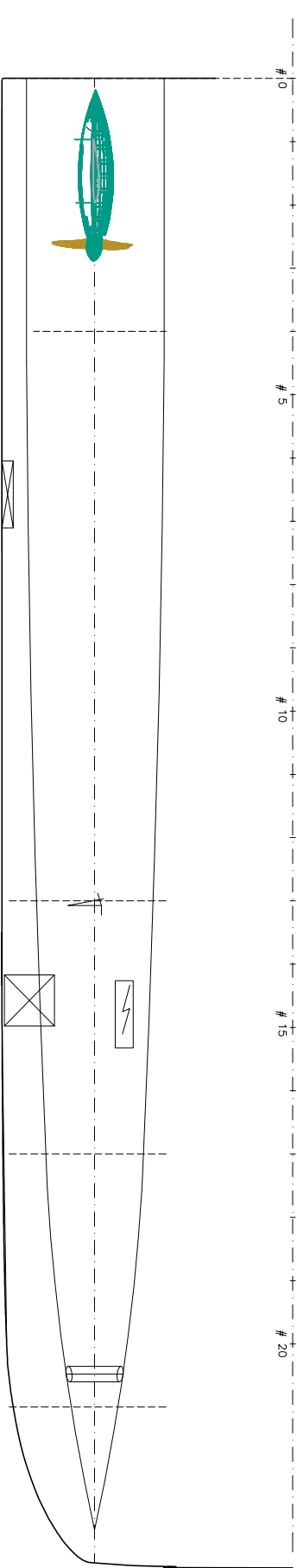
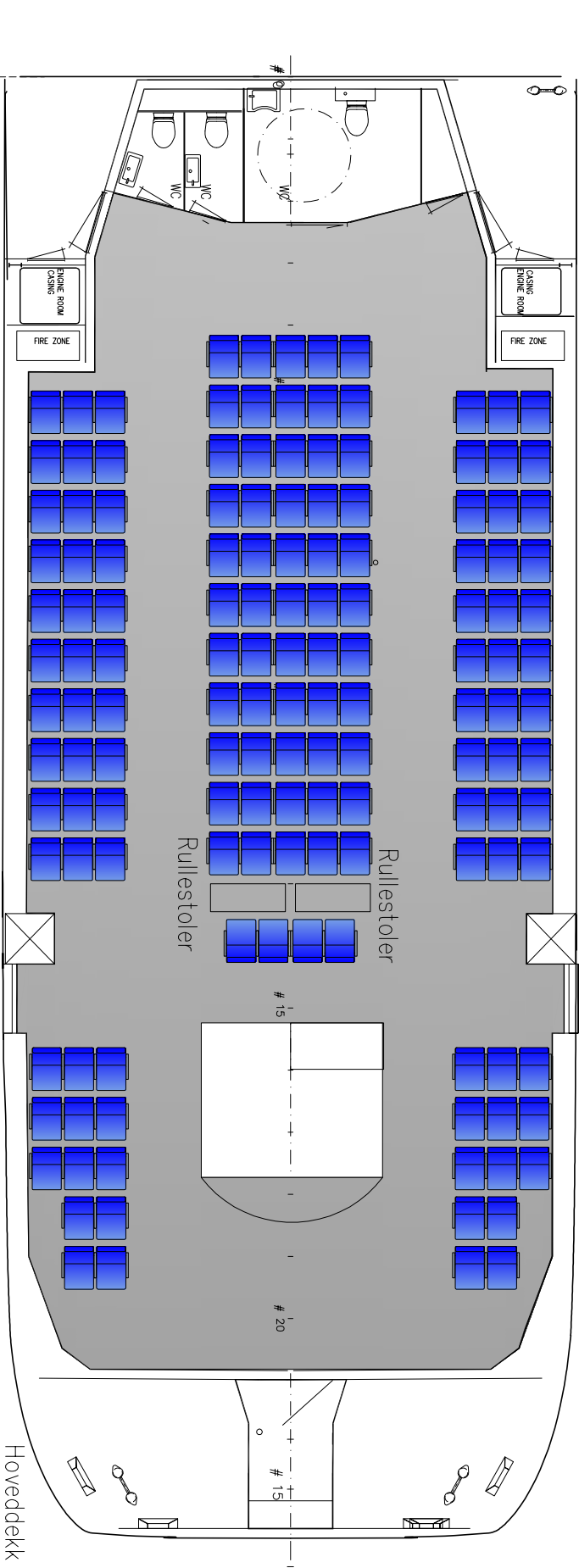
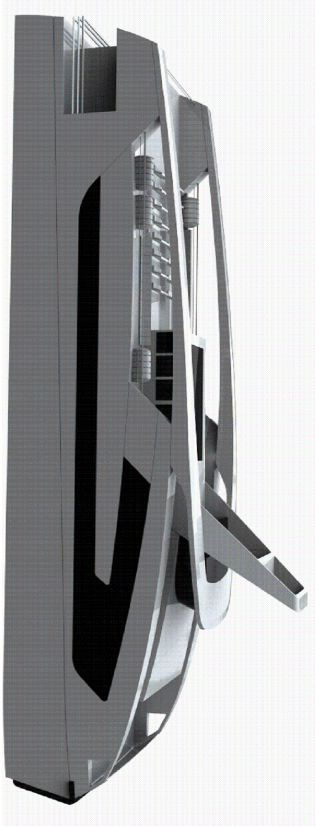
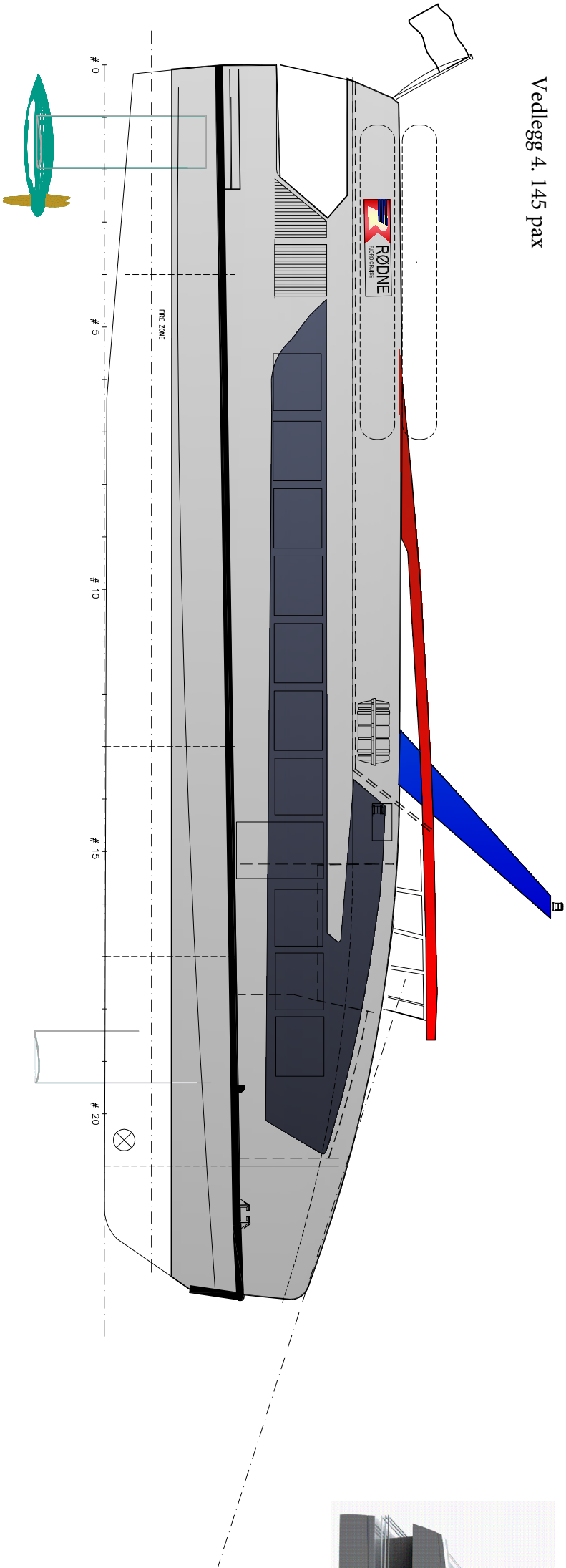
Vedlegg 3. GA 130 pax



"24m "
- LOA **23,9m**
- Bredde på spant **~9,2m**
- Setekapasitet **130**

This drawing and the design is the property of Fjellstrand AS and must not be disclosed to any third person without permission.				Tel. +47 56557600 Fax. +47 56557620 fjellstrand@fjellstrand.no www.fjellstrand.no	
Date 30.08.2019	Drawn E.Tolo	Traced	Scale 1:75		
Checked by:	Appr. date:	Approved by:			
Title GENERAL ARRANGEMENT				Omavegen 225, 5632 Omastrand, NORWAY	
Drawing number GA24-100-101-1				CAD system AutoCAD	
				Project/Vessel 24 m eMaran	
				Replaced by:	

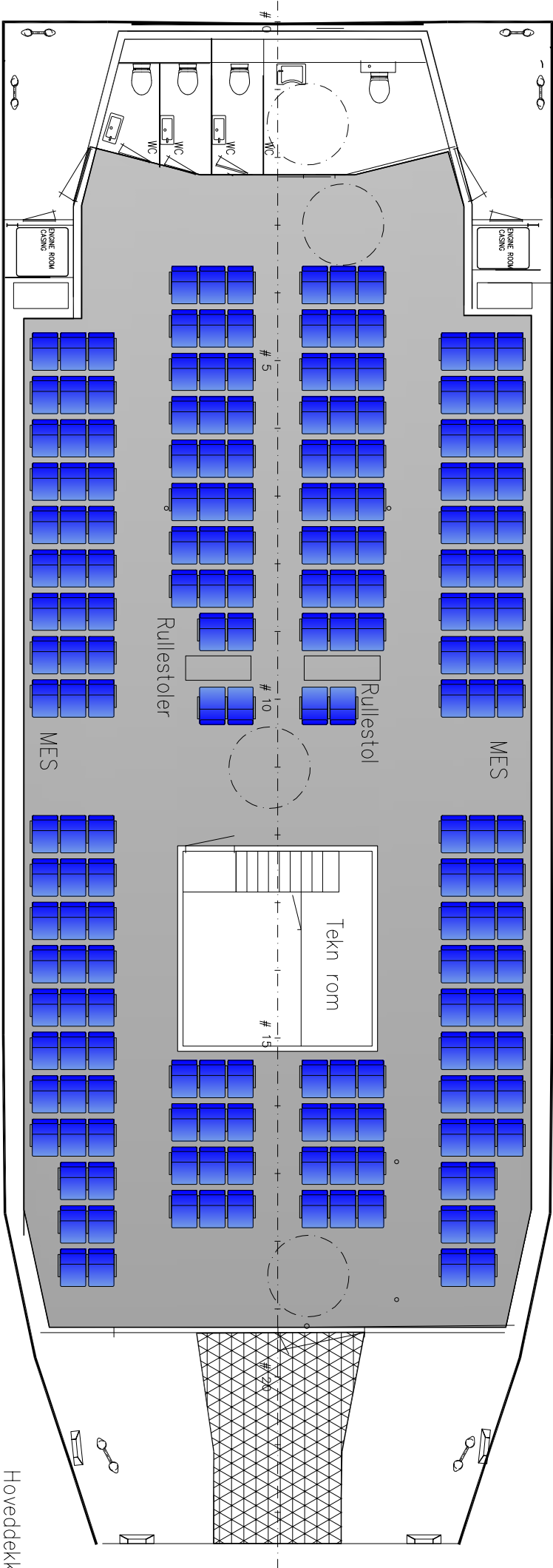
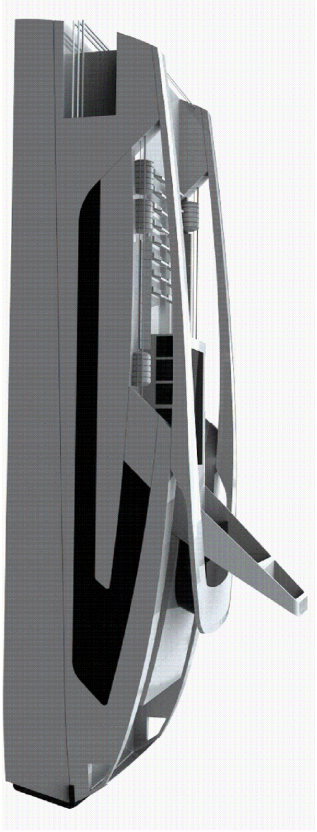
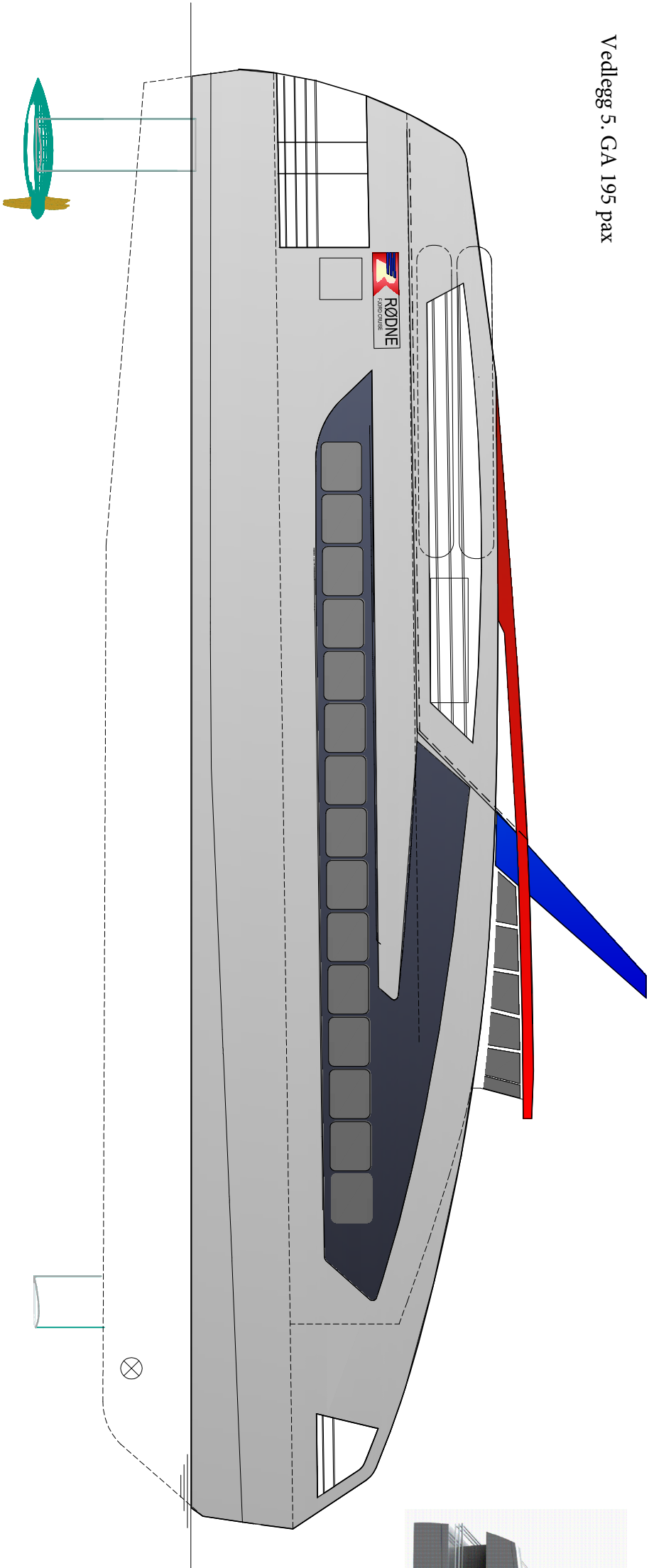
Vedlegg 4. 145 pax



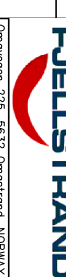
"20m "
- LOA 23,9m
- Brekke på spant ~9,2m
- Setekapasitet 145

This drawing and the design is the property of Fjellstrand AS and must not be disclosed to any third person without permission.					Tel. +47 56557600 Fax. +47 56557620 E-mail: info@fjellstrand.no www.fjellstrand.no	
Date	30.08.2019	Drawn	E.Tolo	Traced	Scale	1:75
Checked by:		Appr. date:		Approved by:		
Title						
GENERAL ARRANGEMENT						
Drawing number					Format	A1
GA24-100-100-1					Replaced by:	
Replacement for:						
Project/Vessel						
24 m eMoran						
Omsorgsven 225, 5632 Omsorstrand, NORWAY						
CAD system						
AutocAD						
Proj. method						
						
FJELLSTRAND						

Vedlegg 5. GA 195 pax



- LOA 28,0m
- Breddde på spant ~10,1m
- Setekapasitet 195

This drawing and the design is the property of Fjellstrand AS and must not be disclosed to any third person without permission.					Tel. +47 56557600 Fax. +47 56557620 fjoellstrand@fjoellstrand.no www.fjoellstrand.no	
Date	30.08.2019	Drawn	E.Tolo	Traced	Scale	
Checked by		Appr. date		Approved by	1:75	
Title						
GENERAL ARRANGEMENT						
Drawing number					Format	
GA28-100-100-1					A1	
					Replaced by	
						
Ombyggen 225, 5632 Omstrand, NORWAY						
CAD system	AutoCAD	Proj. method				
Project/Vessel	28 m eMoran					
Replacement for:						