

# ***ZeFF***

## **ZEFF 180-EL**

### **INFORMASJONSRAPPORT FOR FREMTIDENS HURTIGBÅT - ENERGIEFFEKTIVT DESIGN**



Dok. nr.: 419016-RE-008

Revisjon: 02

**Bergen/Stavanger/Karmøy/Stord/Hyen, 31.08.2023**

**Kunde** : FYLKESKOMMUNENE VESTLAND, TRØNDELAG, NORDLAND,  
TROMS & FINNMARK

**Nøkkelperson** : ROLF OLE JENSEN

**Dokument tittel** : ZEFF 180-EL

**Prosjekt navn** : INFORMASJONSRAPPORT FOR FREMTIDENS HURTIGBÅT -  
ENERGIEFFEKTIVT DESIGN

**Prosjekt nummer** : 419016

**Internt dokumentnr** : 419016-RE-008

**Ekstern distribusjon** : OFFENTLIG TILGJENGELIG VIA KUNDE

**Gradering** : INGEN

Revisjon	Dato	Av	Sjekk	Godkjent	Kommentarer
02	31.08.23	TB	FCO	TB	Del av leveranse M16
01	25.03.22	TB	FCO	TB	Første utgave

## INNHold

<b>1.</b>	<b>INNLEDNING</b> .....	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>BAKGRUNN OG UTFORDRINGEN</b> .....	<b>2</b>
<b>3.</b>	<b>FARTØY HOVEDDATA OG -YTELSER</b> .....	<b>3</b>
<b>4.</b>	<b>ARRANGEMENT OG PASSASJERFASILITETER</b> .....	<b>4</b>
	4.1 PASSASJERSALONG .....	4
	4.2 TILPASNING TIL KAPASITET .....	5
	4.3 SERVICE, UNDERHOLDNING OG INFORMASJON OM BORD .....	7
	4.4 TERMINALER OG AV/PÅSTIGNING .....	8
<b>5.</b>	<b>HYDROFOILKONSEPTET</b> .....	<b>11</b>
	5.1 KONFIGURASJON .....	11
	5.2 MOTSTAND OG LØFT .....	11
	5.3 FOILKONSTRUKSJON .....	12
	5.4 KONTROLL OG STYRING .....	14
	5.5 OPPTREKKBAR LØSNING .....	15
<b>6.</b>	<b>SKROG- OG SKROGKONSTRUKSJON</b> .....	<b>16</b>
	6.1 SKROGFORM, SEKSJONERING OG INNDELING .....	16
	6.2 SKROGKONSTRUKSJON .....	17
<b>7.</b>	<b>ENERGI- OG MASKINERIKONSEPT</b> .....	<b>19</b>
	7.1 ELEKTRISK SYSTEMLØSNING .....	19
	7.2 BATTERIER .....	20
	7.3 LADELØSNING .....	20
	7.4 PROPULSJON POD .....	21
<b>8.</b>	<b>ANALYSER, BEREGNINGER, TESTER OG SIMULERINGER</b> .....	<b>22</b>
	8.1 MOTSTAND OG FREMDRIFT .....	22
	8.2 BEVEGELSE I SJØ OG PASSASJERKOMFORT .....	25
	8.3 STABILITET OG FLYTESTILLING .....	26
	8.4 STYRKEBEREGNINGER .....	26
	8.5 VEKT- OG TYNGDEPUNKTSBEREGNINGER .....	27
<b>9.</b>	<b>KONKLUSJON</b> .....	<b>29</b>

## 1. INNLEDNING

Dette dokumentet beskriver det tekniske konseptet og design som LMG Marin med partnere har utviklet for fylkeskommunene Vestland, Trøndelag, Nordland, Troms og Finnmark (oppdragsgiver) gjennom prosjektet Fremtidens hurtigbåt – Energieffektivt design. Prosjektets hoved formål er å utvikle utslippsfrie og energieffektive passasjer hurtigbåtløsninger som tilfredsstill kombinerte krav til hastighet, frekvens, og rekkevidde som forventes for ruter langs norskekysten.

Den presenterte løsningen baserer seg på vårt såkalte ZeFF konsept, et batterielektrisk hydrofoilartøy som har fått benevnelse ZeFF 180-EL. Løsningen er et resultat av en prosjekt-designfase som startet i november 2021 og fullført i mai 2023 med tilhørende byggespesifikasjon. LMG Marin har i dette prosjektet støttet seg til samarbeidspartnerne Servogear for propulsjonsløsning, Seam for batterielektrisk fremdriftsløsning, Brødrene Aa for skrogkonstruksjon og estimering av anskaffelseskostnader, samt Norled for innspill til drift- og driftskostnader.

For å sikre den beste ekspertise til å utvikle fremtidens hurtigbåt basert på hydrofoilkonsept har LMG Marin også benyttet utvalgte underleverandører med tilhørende nøkkelkompetanse. Dette inkluderer Sintef Ocean for assistanse med CFD analyser og modelltester, italienske Cariboni som spesialist på utvikling av hydrofoil bevegelseskontrollsystemer, franske Pixel sur Mer for utvikling av bevegelseskontroll software, franske gSea design for strukturell dimensjonering av hydrofoilsystem, DNV for design gjennomgang, industridesigner Framlab for fokus på reiseopplevelsen, med mer.



Figur 1: Illustrasjon av ZeFF – Zero emission Fast Ferry

## 2. BAKGRUNN OG UTFORDRINGEN

Prosjektet Fremtidens hurtigbåt – energieffektivt design søker å løse hovedutfordringen fylkeskommunene langs kysten står ovenfor i sine mål om å oppnå utslippsfri kollektivtransport. Hurtigbåter på dieseldrift representerer høyest andel utslipp fra kollektivtransport (sammenlignet med buss, ferger, trikk, og tog), og hvor utslippsfritt alternativ teknisk sett er mest utfordrende å løse. Den åpenbare utslippsfrie hurtigbåt kan i utgangspunktet synes å være erstatning av dieselmaskineriet i dagens katamaraner med batterielektrisk fremdrift. Ulempene med en slik løsning er at mervekten batteriteknologi medfører resulterer i redusert hastighet og/eller redusert rekkeviddekapasitet. Dette kan aksepteres for en del kortere ruter, men vil ikke være egnet på lengre ruter hvor både rekkevidde og hastighet er en forutsetning for et attraktivt tilbud. Fremtidens hurtigbåt – energieffektiv design har utfordret norske skipsdesignere til å utvikle alternative skrogkonsepter som i kombinasjon med batteriteknologi kan dekke nevnte behov.

LMG Marin har fra tidligere erfaring med flere ulike hurtigbåt skrogkonsepter, men av prioritet til energieffektivitet fremfor noe annet ser vi her på for oss ny skrogteknologi. Det mest energieffektive skrogkonseptet som finnes, er som de fleste hydrodynamikere vil være enige om et fulløft hydrofoilfartøy. Mange vil nok tenke tilbake på «hydrofoilen» som opererte flere strekninger langs kysten på 70-tallet og spørre seg hvorfor en da gikk bort i fra slike løsninger. Svaret er at de selvstabiliserende hydrofoilene som da ble brukt i kombinasjon med sine ineffektive propulsjonsløsninger ikke representerte en energieffektiv løsning og ble erstattet hovedsakelig på grunn av høye drivstoffkostnader. Mer energieffektive hydrofoilkonsepter finnes derimot i drift i utlandet den dag i dag (noen også bygget i Norge), og disse er basert på aktiv kontroll av foilene (undervannsvinger) som løfter skroget helt opp av vannet. Men heller ikke disse løsningene utnytter hydrofoilkonseptets energieffektivitetspotensial fullt ut da også disse baserer seg på relativt ineffektive propulsjonsløsninger. I vårt hydrofoilkonsept utnytter vi derimot det beste fra flere verdener og kombinerer et fulløft hydrofoilkonsept med ny høyeffektiv elektrisk propulsjonsteknologi, og oppnår med dette en energieffektivitet som med tidligere teknologi ikke var mulig.

Som sagt, kombinasjon av hydrofoil og ny elektrisk propulsjonsløsning gir den energieffektivitet som er nødvendig for å oppnå fart/rekkevidde kombinasjonen som etterspørres. Men et slikt konsept har spesielt to andre egenskaper som synes attraktive for formålet. En tradisjonell hurtigbåt er relativt støyende, hvor dominerende støykilder er maskineri og sjøsprøyt. Med vårt konsept oppnås svært støysvak løsning da dieselmaskineri erstattes med batteridrift og skroget løftes opp av vannet. I tillegg vil sjøsyke og ubehag i sjøgang reduseres til det minimale da et løftet skrog unngår sjøslag og aktiv kontroll av foilene vil motvirke bølgebevegelser. Fartøyet er faktisk i stand til å operere i høy hastighet og overholde normale komfortkriterier i alle sjøtilstander som forventes innen aktuelt fartsområde (normalt kreves hurtigbåter å redusere fart i dårlig vær). Potensialet er altså der for et «Kinderegg» hvor utslippsfri drift kombinert med økt passasjerkomfort og redusert reisetid kan erstatte dagens løsninger.

I tillegg introduserer vi ytterligere løsninger som vi mener bør forventes av fremtidens hurtigbåter. Dette inkluderer trinnløs løsning i henhold til krav for universell utforming inkludert på/avstigning til/fra kai i alle situasjoner, passasjersalongløsning som enkelt kan tilpasses varierende komfort- og kapasitetsbehov, trådløs bestilt- og oppsøkende cateringservice, adskilt på/avstigning, og mer som vi vil presentere gjennom dette dokumentet.

### 3. FARTØY HOVEDDATA OG -YTELSER

Det utviklede fartøyskonsept (ZeFF 180-EL) har følgende hoveddimensjoner og -karakteristikker:

Fartøystype	Hurtiggående passasjerfartøy
Passasjerkapasitet	180 pax (maks. kapasitet, krav oppdragsgiver)
Service hastighet	40 knop (effektiv operasjon fra 30 til 40 knop)
Fartøys rekkevidde	+50 n.mil v/40 knop
Energieffektivitet	42% (energiforbruk relativt til oppdragsgivers referanse)
Fartøyskonsept	Hydrofoil, fulløftet m/aktiv kontroll
Foilkonsept	3-punkts, T-foil forut + H-foil akter m/integrert propulsjon
Foil bevegelseskontrollsystem (RCS)	Hydraulisk-mekanisk flap/ror kontroll m/kontrollsystem
Skrogtype	Trimaran, senterskrog m/små utriggere
Skrogmaterial	Karbonsandwich
Lengde, totalt	28,6 m
Største bredde	12,7 m
Skrogdybde	2,85 m
Fribord, av løft	1,50 m
Maks. dypgående av løft	4,65/5,65 m (forut/akter)*
Typisk dypgående på løft	2,90 m
Energi- og fremdriftsløsning	Batterielektrisk
Batteriløsning (hoved energiløsning)	Li-Ion NMC kjemi, vannkjølt
Landstrømløsning	2 x 1900 kW likestrøm, manuell type plugger
Redundant energiløsning	2 x 120 kW «take home» dieselgeneratorer
Propulsjonsløsning	2 x 1000 kW elektrisk pod, propell m/variabel stigning
Bemanning	Typisk 3 - 4 personer
Redningskapasitet	MES, 2 x 100 pax lukkede flåter (+100 pax reserve)
MOB løsning	MOB nett
Fartøysklasse, Sjøfartsdirektoratet	IMO HSC 2000, fartøy type A, fartsområde 4
Operasjonsbegrensning	Operasjon til og med 2,5 meter signifikant bølgehøyde
DNV klassenotasjon	+1A HSLC Passenger Craft R3 Battery(power) E0

\* Opptrekkelig løsning tilgjengelig



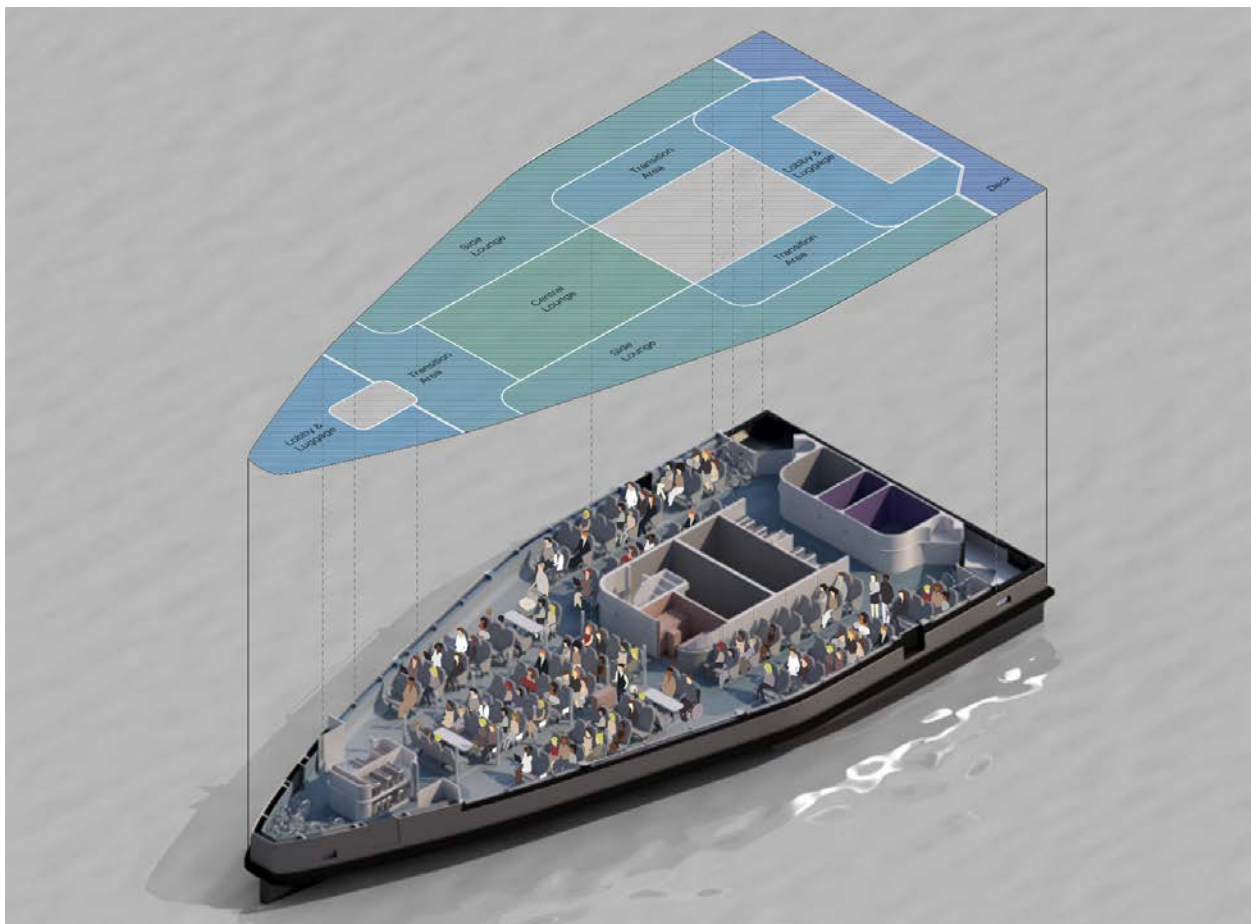
Figur 2: ZeFF 180-EL konseptet

## 4. ARRANGEMENT OG PASSASJERFASILITETER

### 4.1 PASSASJERSALONG

Arrangementet baserer seg på en løsning hvor alle passasjerfasiliteter er lagt på hoveddekk med terskelfri adkomst forut og akter. Hoved kabin/salong er arrangert med sitteplasser for opptil 180 passasjerer med utsyn langs sider og forut, rundt en «øy» men teknisk utrustning, service- og mannskapsfasiliteter i senter, samt toaletter akter med begrenset innsyn. Det er arrangert to langsgående gjennomganger med tversgående passasje forut, akter og i senter. Alle gangsoner har tilstrekkelig bredde for rullestol fremkommelighet, og «parkering» for rullestolbrukere er arrangert på hver side midtskips med tilkomst til bord og mulighet for faststropping. Lagringsplass til bagasje er nær innganger forut/akter, og plassering av mindre håndbagasje kan i tillegg gjøres under seter. De to passasjertoalettene er av type unisex hvor ett av dem også tilfredsstillt krav til funksjonshemmede og utrustet med stellebord.

Passasjersalong med bakenforliggende soneinndelingsfilosofi er vist i figuren nedenfor:



Figur 3: Passasjersalong m/soneinndelingsfilosofi

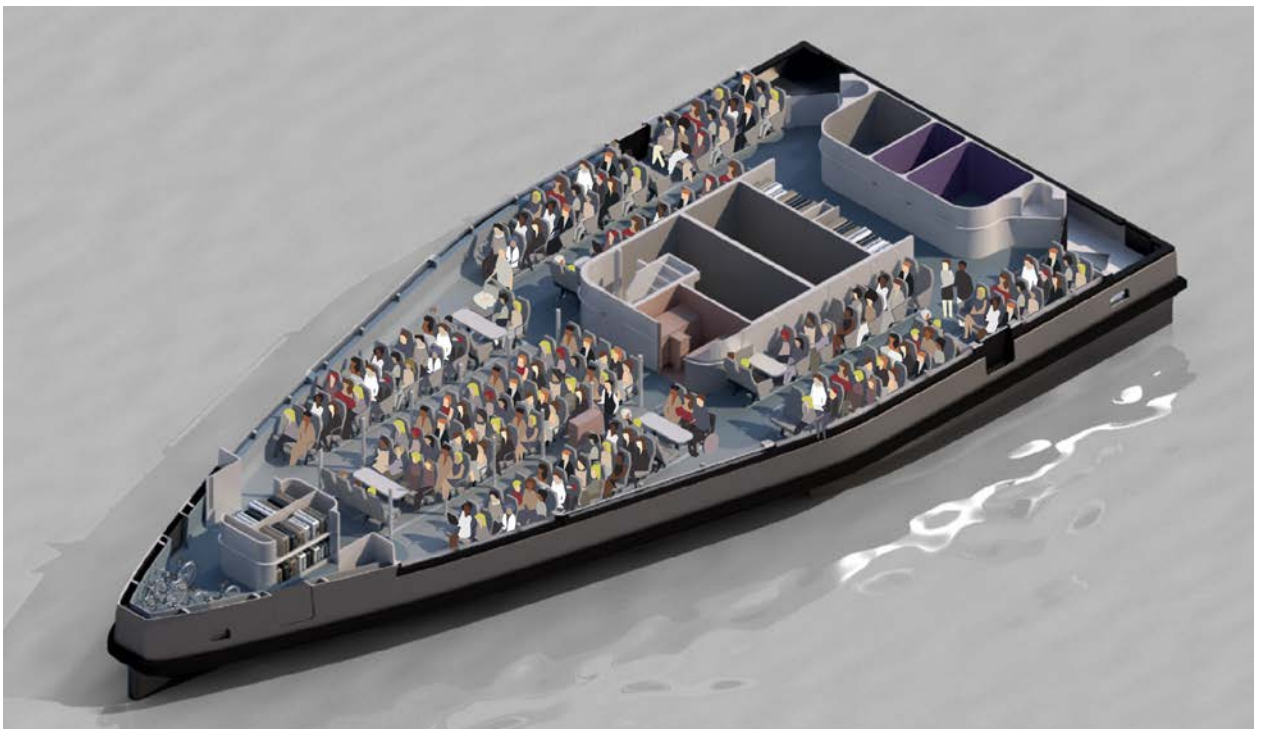
## 4.2 TILPASNING TIL KAPASITET

En typisk rute vil ha varierende behov over dager, uker og sesonger. Over en uke er det gjerne størst behov for kapasitet på fredager og søndager, mens ukedagene kan ha lavere belegg. Tilsvarende kan sommersesongen være mer preget av turisme og utfarter mens lokalbefolkning dominerer i vinterhalvåret. Da seter og bord uansett er arrangert på skinneløsninger i dørk ser vi for oss tilpasning av arrangementet etter behov (som aktivt utnyttet i flyindustrien), mulighetene er mange som en kan se illustrert nedenfor.



Figur 4: Alternative konfigurasjoner av seter, bord, og sykkelstativ (eksempler)

På travle utfartshelger ser vi for oss maksimering av antall sitteplasser (gjerne opp mot 200 passasjerer) ved å ta ut bord og benytte relativt kort avstand mellom seterekker.



Figur 5: Passasjersalong arrangert for høy kapasitet

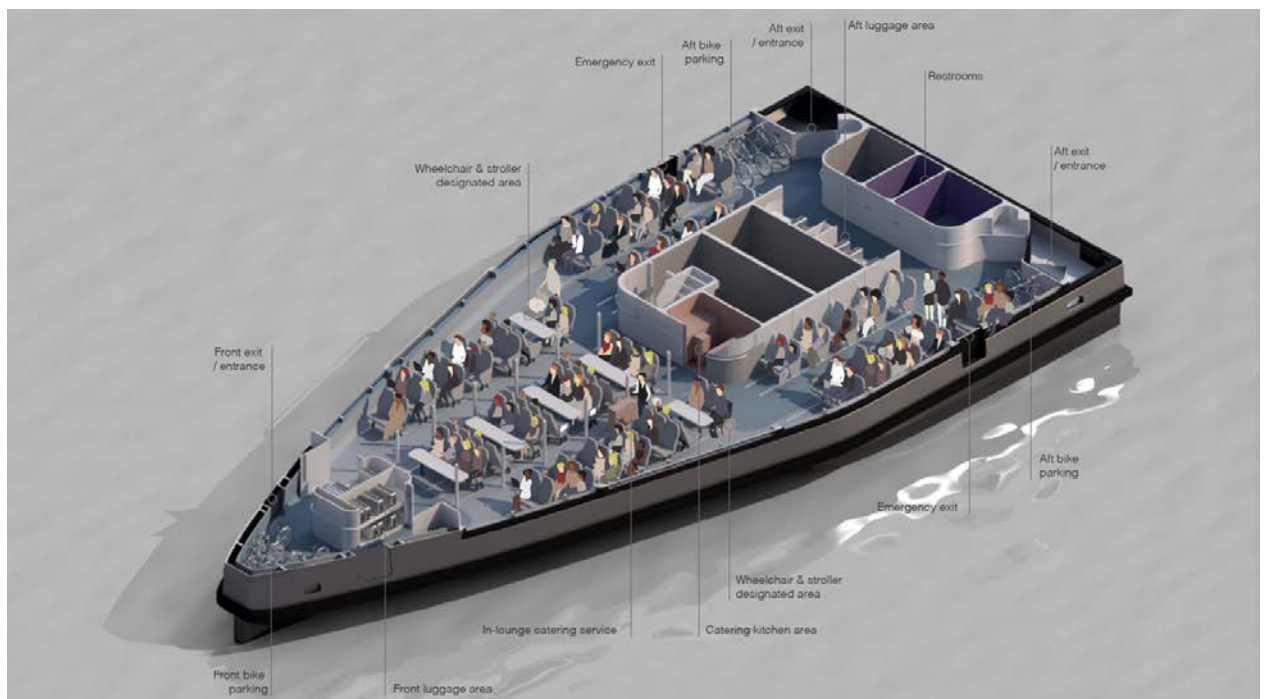
Gjennom hverdagene kan det være muligheter for å redusere kapasitet og heller bidra til økt komfort for dagpendlere. Redusert antall seter gir rom for flere bord, bedre benplass, og nødvendig plass for å legge ned seterygg, eller lavere energiforbruk (pga. lavere vekt). En løsning med 145 passasjerers kapasitet er illustrert i figuren nedenfor.





**Figur 6: Passasjersalong arrangert for medium kapasitet**

Dersom det forventes lavt belegg med behov for høy komfort og variasjon av medbrakt bagasje kan en i tillegg til utstrakt bruk av bord og fasiliteter for benplass og justerbar rygg også gi rom for stativ for transport av sykler eller annen spesialbagasje. Det kan også vurderes å benytte alternative seter med høyere komfort, større bredde og/eller doble armlener. Mulighetene er mange som en ser av figuren nedenfor.



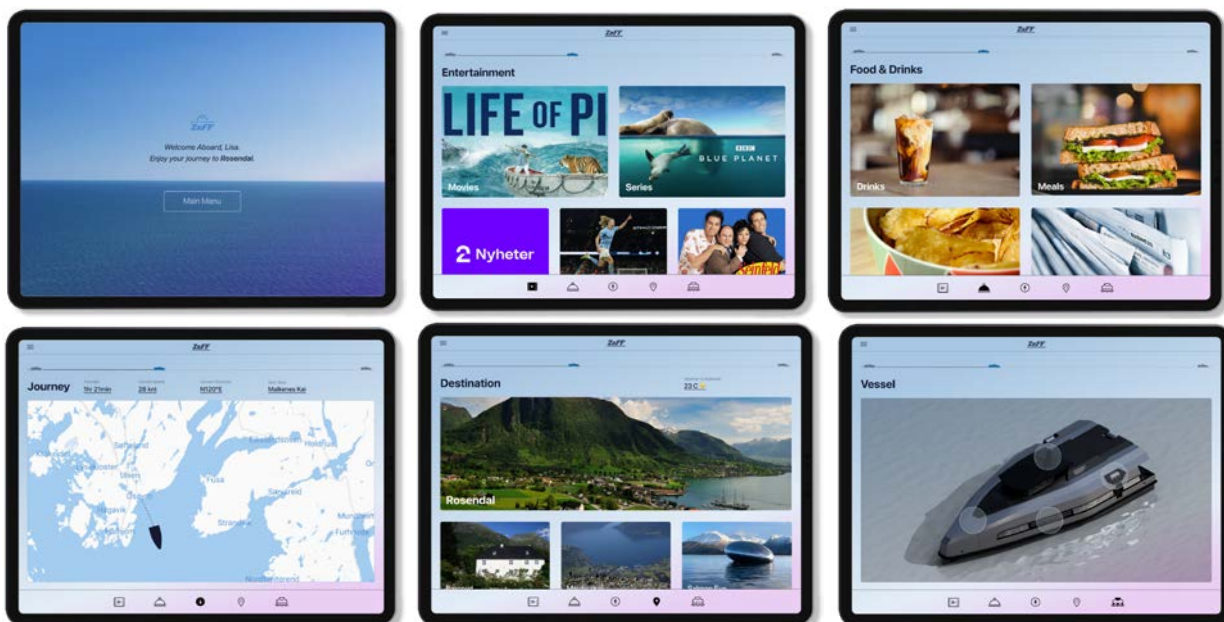
**Figur 7: Passasjersalong med spesielt tilpasset arrangert**

Et utvalg av seter, bord, og stativer kan oppbevares ved avgangsterminal og arrangement kan dermed enkelt tilpasses neste dags forventede behov.

### 4.3 SERVICE, UNDERHOLDNING OG INFORMASJON OM BORD

Av flere hensyn foreslås en cateringløsning etter samme prinsipp som anvendes for passasjerfly hvor besetning i tillegg til utsalg fra tralle tar imot ordrer via app og serverer passasjerene ved deres sitteplass. I stedet for kiosk arrangeres da lagringsområde for ferdigmat og andre utsalgsprodukter i tverrgang midtskips. Løsningen er kompakt, krever lite energi, er et godt tilbud til passasjerer, og er forenlig med et høyhastighets konsept hvor passasjerer anbefales å sitte under overfart med sikkerhetsbeltet på.

Muligheter for service, underholdning og informasjon fra passasjer sete kan tilrettelegges med pad løsninger i seterygg eller påloggingsmulighet fra medbrakte enheter.



Figur 8: Eksempel, digital meny



Figur 9: Serveringstilbud om bord

#### 4.4 TERMINALER OG AV/PÅSTIGNING

Et etter vårt syn noe forsømt område ved hurtigbåtdrift er tilretteleggelse for god og effektiv av/påstigning ved terminaler. Skal man virkelig tilfredsstille universell utforming med terskelfri adkomst ved ulike tidevannsnivå er det primært flytebryggeløsninger som gjelder (alternativer med hydraulisk landgang og heis om bord er ikke forenlig med en energieffektiv løsning). Lengde på flytebryggens landganger kan tilpasses slik at krav til maksimalt tillatt helning overholdes, selv ved stormflo, og med samme fribord på flytebrygge og båt blir selve ombordstigningen horisontal.

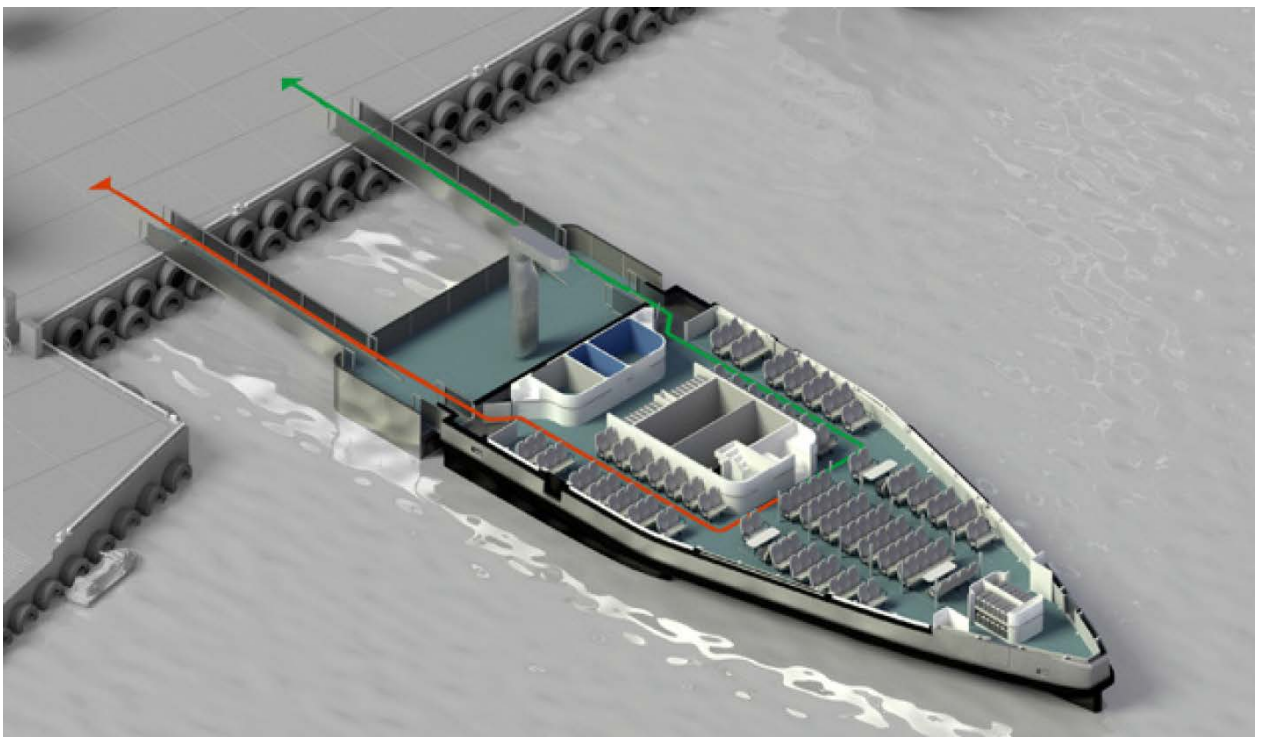
For hurtigbåtterminaler er det også hensiktsmessig å fasilitere for samtidig, men separert av- og påstigning. En slik løsning gir åpenbare fordeler hva gjelder terminaltid hvor lading ikke er nødvendig, i tillegg til en oversiktlig passasjerflyt, redusert stress for bevegelseshemmede passasjerer, mulighet for bagasjehåndtering av mannskap, etc.

En flytebrygge representerer også et effektivt areal for plassering av ladetårn. Dersom en i tillegg og på grunn av begrenset elektrisitetsnettkapasitet har behov for bufferbatterier, kan også disse integreres i brygge. Til og med servicetanker for vann- og avløp finnes det rom for.



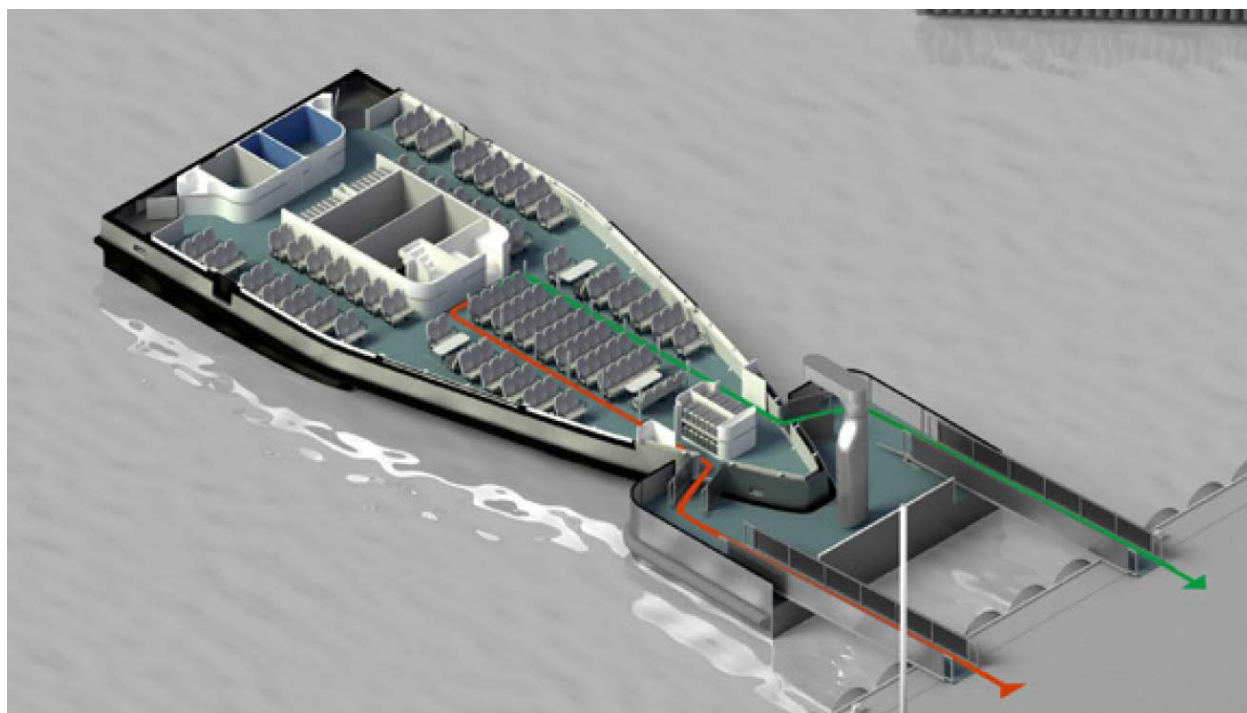
**Figur 10: Sideanløp via flytebrygge med separat av/påstigning**

En flytebryggeløsning kan tilpasses i form til den enkelte fartøystype, og dermed muliggjøre sikker terminaloperasjon uten å være avhengig av fast fortøyning. En slik løsning kan tilrettelegges uten at det forhindrer andre fartøystyper å benytte anlegget. Løsning gir rom for separat av/påstigning ved hekk-anløp, sideanløp, og bauganløp. Typisk ser en for seg hekk/sideanløp i endeterminaler, mens bauganløp er effektiv løsning for mellomstopp.



**Figur 11: Hekkanløp via flytebrygge med separat av/påstigning**

En flytebrygge kan også gi den nødvendige avstanden til fast kai for at dybdebegrensning ikke skal forhindre anløp med hydrofoiltartøy.



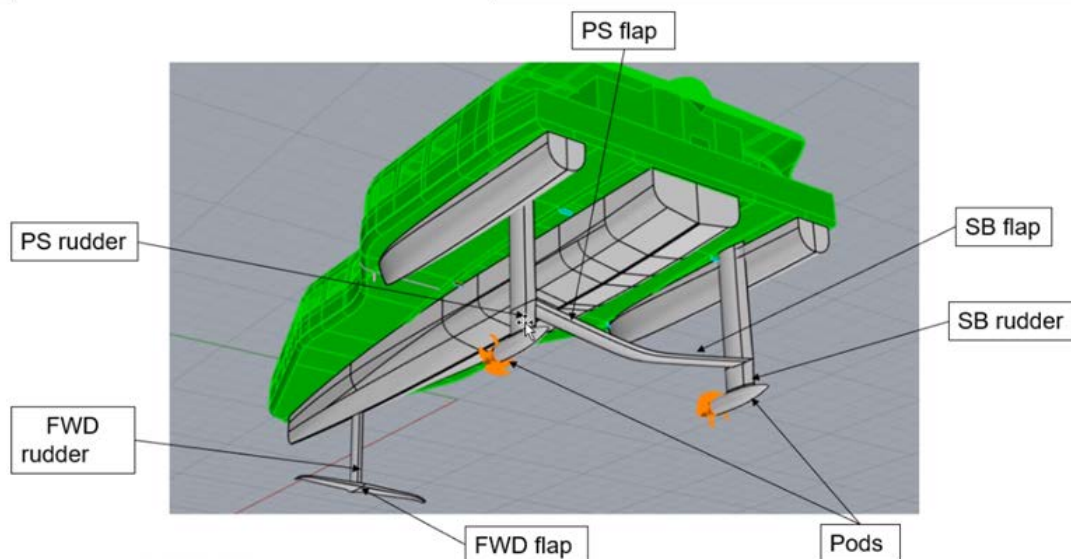
Figur 12: Bauganløp via flytebrygge med separert av/påstigning

## 5. HYDROFOILKONSEPTET

ZeFF er som nevnt et fulløft hydrofoilkonsept hvor hele skroget løftes ut av vannet når fartøyet går i høy hastighet, og hvor aktiv kontroll med flaps er nødvendig for at fartøyet skal løftes opp og «fly» stabilt. Fulløft hydrofoilkonsept som ZeFF eksisterer per i dag, men har frem til nå og for fartøy av denne størrelse ikke vært kombinert med redundant foilintegrert elektrisk propulsjonsløsning slik som det her legges opp til.

### 5.1 KONFIGURASJON

Skrog basert på trimaran prinsipp egner seg godt i kombinasjon med en 3-punkts foilløsning hvor en symmetrisk T-foil er montert i forre del av senter-skrog og en H-foil med integrert propulsjon er innfestet i de to sideskrogene akter. Med denne konfigurasjon har en kun tre struts (vertikal del av foilsystem) som penetrerer vannflaten og forbinder foilene til skrog, og av energieffektivitetshensyn ønskes færrest mulig slike struts. Løsning hvor aktre foilsystem med propulsjon ikke står i rett linje bak det forre systemet reduserer også grad av innbyrdes hydrodynamiske forstyrrelser. Den arrangerte trimaran- og 3-punkts foilløsning anses dermed som enkleste fulløft hydrofoilløsning som også er dynamisk stabil. Dette kombinert med integrert propulsjon som ikke krever egen innfesting mot skrog representerer etter vår oppfatning den hydrofoilkonfigurasjonen med høyest energieffektivitetspotensial.

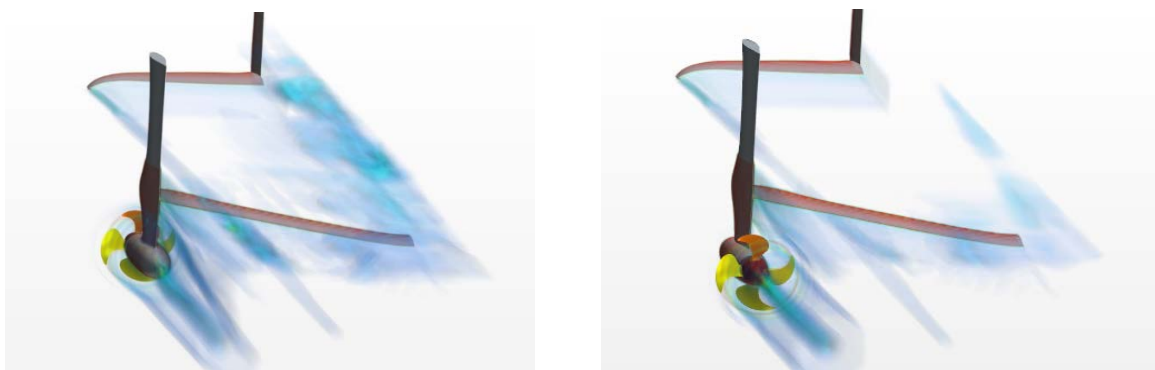


Figur 13: ZeFF skrog og hydrofoilkonsept (viser ikke endelig løsning)

### 5.2 MOTSTAND OG LØFT

Hoved hensikt med foilsystemet er å skape tilstrekkelig løft for å løfte fartøyet opp av vannet og oppnå dette med lavest mulig effektforbruk. Flapsutslag vil benyttes for å kompensere for variasjoner i nyttelast, men lavest motstand, og ønsket designpunkt, er med flaps i nøytral stilling. Systemets totale løft må tilsvare fartøyets deplasement (vekt) og det hastighetsavhengige løftet må oppnås ved planlagt operasjonshastighet. Videre må fordeling av løft på forre og aktre foil tilpasses fartøys langskips tyngdepunkt, slik at fartøy løftes parallelt ut av vannet. Design av et foilsystem er en iterasjonsprosess hvor krav til løft og minimum motstand må passe mot parametere som vekt, tyngdepunkt, styrke, stivhet, kavitasjonsgrense, og mer.

Numeriske analyseverktøy har som beskrevet senere i dokumentet vært viktige verktøy for design og optimalisering av foilsystemet. Med forenklede metoder kunne oppgaven synes triviell, men detaljert modellering av hele systemet viste seg nødvendig for å få frem realistiske effekter. Her har det f.eks. vist seg at forre foils strømningsmønster påvirker det aktre i slik grad at dette må hensyntas ved geometrisk utforming. Videre har kavitasjon vist seg som en betydelig utfordring som en spesielt for sammenføring mellom strut og selve foilet måtte gå flere runder før geometrisk løsning ble konkludert. Analysearbeid viser også at ulempene med å akselerere vannmasser fra en trekkende propell over foilkonstruksjonen er større enn å plassere en skyvende propell i strømningsfeltet bak.

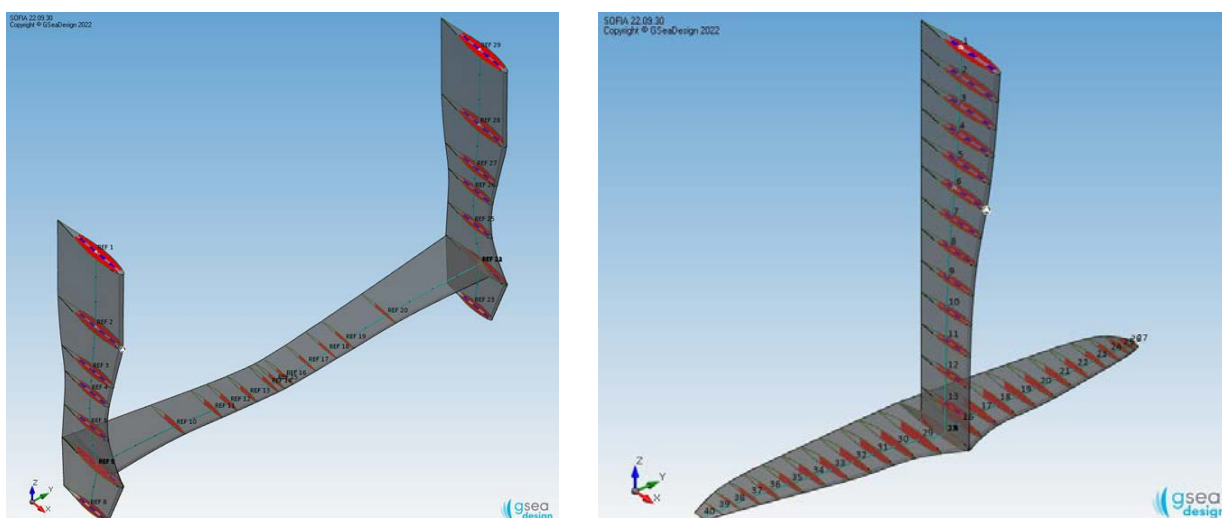


Figur 14: CFD analyse, skyvende og trekkende pod (halvt system vist)

Resultatet etter omfattende analysearbeid er et egnet foilsystem designet for «take-off» ved rundt 25 knops hastighet, operasjonshastighet mellom 30 og 40 knop, og kavitasjonsfri +40 knops topphastighet.

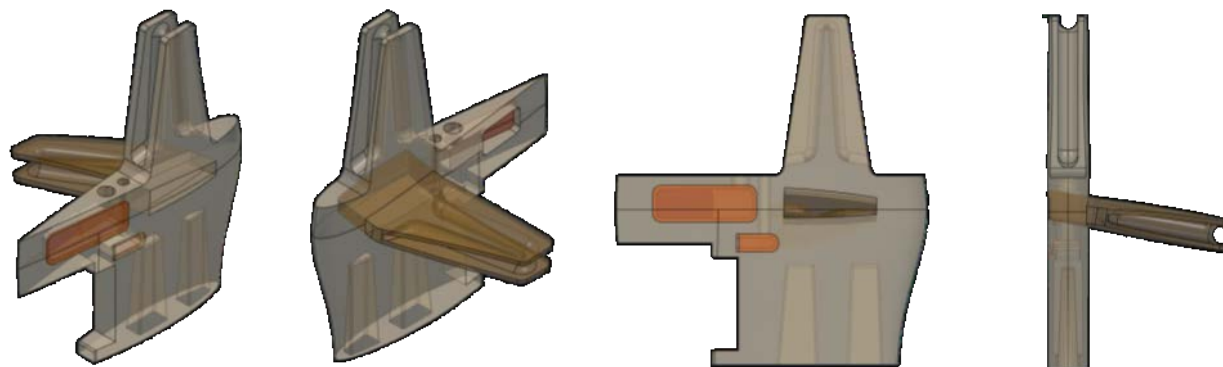
### 5.3 FOILKONSTRUKSJON

Med hensyn på hydrodynamiske forhold ønsker en seg et foilsystem med best mulig slankhet, men dette begrenses av hvor store tverrsnitt en trenger for hulrom til gjennomføringer, samt tilstrekkelig styrke og stivhet. Spesielt for struts er det nødvendig med hulrom for gjennomføringer i form av armer som styrer utslag på ror/flaps (mer om dette senere), elektriske kraftkabler, sensor kontrollkabler, olje- og kjølevannsrør.



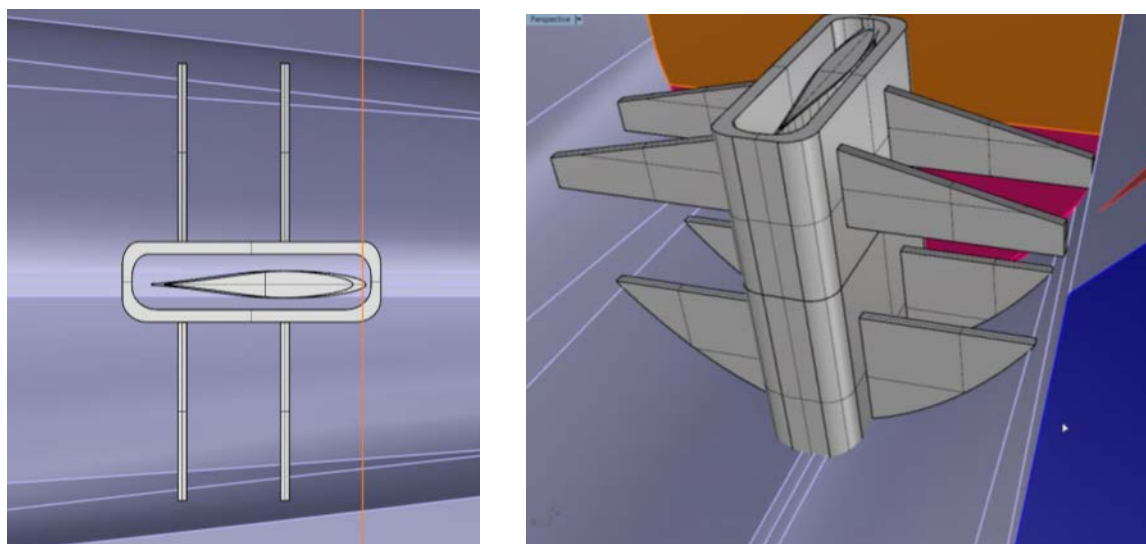
Figur 15: Aktre/forre foil med snitt i foil og strut fra analysemodell

Foilsystemet er bygget opp som en kompositt/metall hybridkonstruksjon. Hoved styrkeelement i struts og foiler er solid ensrettet karbonfiber støpt i Epoxy matrise, med PMI type skum som fyllmasse for å oppnå ønsket geometri, og et beskyttende lag av vevd karbonmatte som overflate. Konstruksjonen bygges opp i flere steg med herding i autoklavovn og bruk av hunnformer for å sikre slett og riktig overflategeometri. Sammenføyning mellom strut og foil er konstruert i metall for å oppnå tilstrekkelig små overgangsradiuser. Anvendt metall er enten smidd titan eller høyverdig stål og skjøt mellom metall og kompositt gjøres som kombinert bolt- og limforbindelse.



Figur 16: Metallisk sammenføyningsdetalj foil/strut/pod akter

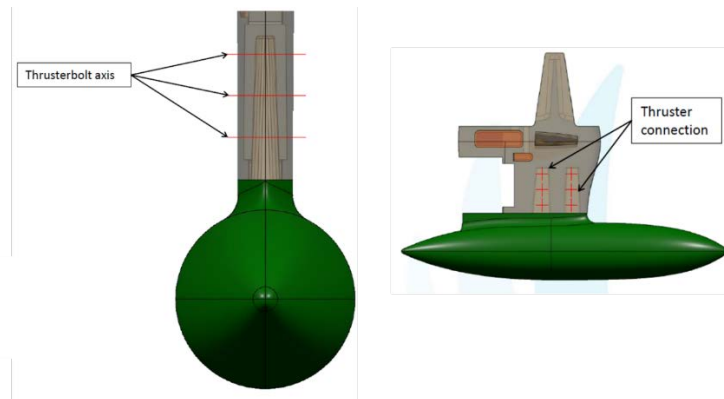
For T-foil forut er selve foil løfteflatene utkragere fra strut med styrkebærende konstruksjon forut i flaps. Styrke og stivhet er tilstrekkelig for normal operasjon, men sammenføyning mot strut er konstruert som bruddpunkt i tilfelle kollisjon med massivt flytende legeme eller grunnstøting. Innfesting i senterkrog er etter momentarm-prinsipp mellom bunn og hoveddekk, hvor strut tres inn i geometrisk tilpasset hulrom som deretter fylles med limmasse. Også for innfesting til skrog er strut rett under bunn konstruert som bruddpunkt i tilfelle massiv kollisjon.



Figur 17: Prinsipp for innfesting av strut i skrog (forre T-foil vist)

For H-foil akter er selve foilet utformet med svak V-form som sammen med plassering av struts mot insiden av sideskrog gir tilstrekkelig stivhet for det aktuelle frie spenn. Hoved styrkebærende konstruksjon er også her i foilets forre del da flaps er integrert i bakkant på hver side.



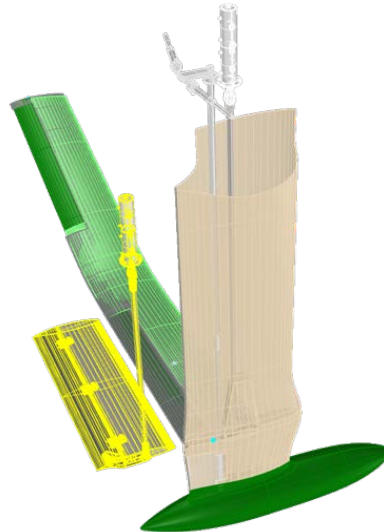


Figur 18: Prinsipp, innfesting av pod til strut

Innfesting av propulsjonsenheter er i form av bolting mot ovenfor nevnte metalliske sammenføyningsstykker.

#### 5.4 KONTROLL OG STYRING

Et fulløft hydrofoilfartøy er avhengig av aktiv kontroll for manøvrering og «flight control». I tillegg kan samme system benyttes for aktiv bevegelseskontroll i sjø for å øke passasjerers komfort. For vårt hydrofoilkonsept er det integrert et sett med flaps på foilene og ror på struts som benyttes til dette formål, tilsvarende som benyttes på fly. Disse kontrollflatene styres av hydrauliske sylindere plassert oppe i skroget, med mekanisk overføringsanordning gjennom struts og ned til flaps/ror. Sensorer er montert for å bekrefte at ønsket utslag er oppnådd.



Figur 19: Mekanisk overføring fra hydraulikksylinder til flaps

Flaps brukes aktivt når fartøyet øker hastighet og skal opp på løft. Når fartøyet opererer i høy hastighet, vil små permanente utslag på flaps være nødvendig for å opprettholde ønsket flyvehøyde avhengig av lastekondisjon (nøytral posisjon er gjerne 50% dwt). Flaps og ror benyttes også for manøvrering i høy hastighet (i tillegg til variert pådrag på de to propulsorene), hvor flapsene også kan kontrollere om en ønsker at fartøy skal legge seg noe i svingene. Flaps kan også benyttes ved retardasjon og her vil en passe på at dette ikke utføres altfor brått. Kontroll av flaps og ror i situasjoner som her beskrevet vil være implementert som automatikk i fartøys manøversystem.

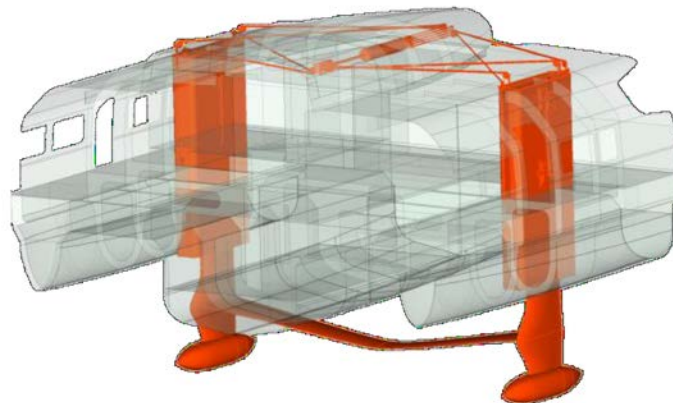
Flaps og ror vil også være del av fartøys sikkerhetssystem som ser til at fartøy sakker på og legger seg trygt ned på skrogene dersom det skulle oppstå en feiltilstand som f.eks. et kilt flaps eller kollisjonsskader på foiler. Omfattende undersøkelser ved bruk av FMEA verktøy vil benyttes til dette formål, og nødvendige sikkerhetsaksjoner vil implementeres som situasjonsbetinget automatikk.

For bevegelseskontroll i sjøgang er det implementert et eget styringssystem (ride control system) med fartøys spesifikt utviklet software og et sett med akselerometre som styrer kontrollflatene for mest behagelig gange. Slike systemer finnes som generiske produkter som da tilpasses til det enkelte fartøys karakteristikk. Selve softwaren er utviklet og testet ut som del av utviklingsprosjektet ved bruk av simuleringverktøy.

## 5.5 OPPTREKKBAR LØSNING

Et hydrofoilfartøy har en relativt stor dypgang av løft som i noen tilfeller vil være en ulempe. Som del av prosjektet er det derfor utviklet et konsept for å kunne trekke opp foilene i tilfeller hvor en vurderer anvendelse av fartøyet i ruter med grunne havner. En slik løsning kan en se for seg implementert kun for forre T-foil (og forutsette bauganløp for grunne havner) eller for hele systemet. Hvor høyt en vil trekke opp foilene er også en variabel, men i prinsipp kan de trekkes helt opp til skrog.

Bruk av flytebrygge som distanserer anløps grensesnitt fra fast kai vil i de fleste tilfeller være et foretrukket alternativ fremfor opptrekkbare foiler.

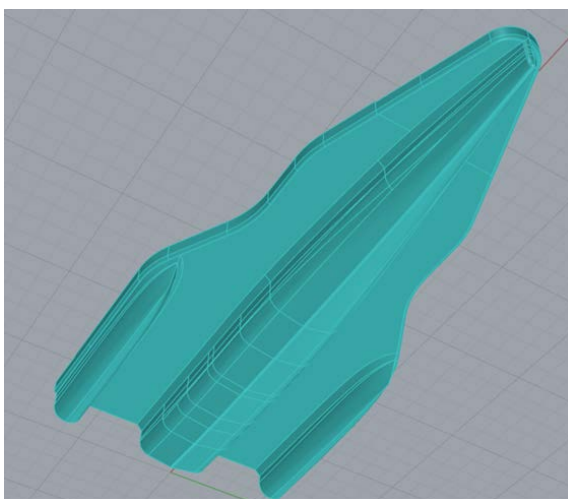


Figur 20: Prinsipp for opptrekkbar foilløsning (aktre system vist)

## 6. SKROG- OG SKROGKONSTRUKSJON

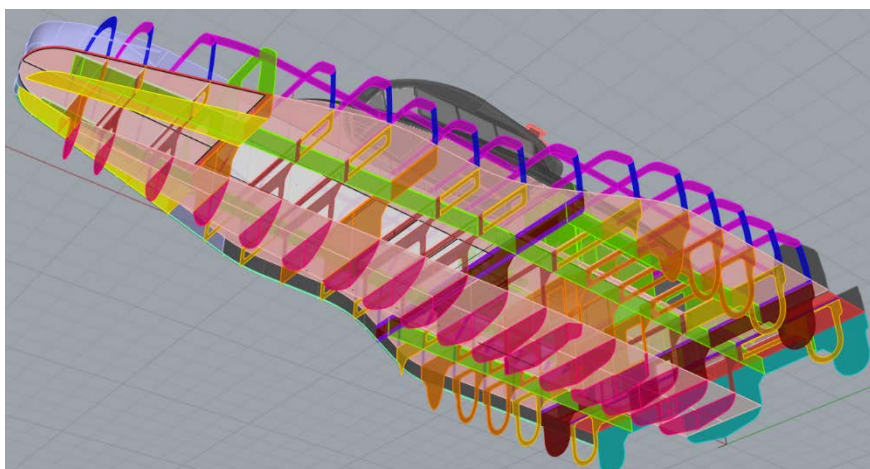
### 6.1 SKROGFORM, SEKSJONERING OG INNDELING

Det valgte trimaran skrogkonseptet er en stabil plattform med god overlevelsessevne av løft (deplasementsmode) og egner seg godt i kombinasjon med vår 3-punkts foilløsning. Sideskrogene, eller uttriggerne er relativt små, men besørger stabilitet når fartøyet ligger av løft og er i tillegg effektivt innfestingspunkt for integrasjon av aktre foilsystem. Senterskroget er langt og slankt som gir lav motstand i fartøys akselerasjonsfase. Sideskrogene er symmetrisk utformet, løftet noe over kjøllinje for senterskrog og med avpasset oppdriftsvolum for krav til stabilitet og flytestilling. Sideskrogene er plassert nært ut mot skipsside slik at det kan oppnås trygg evakuering hvor redningsflåter har godt anlegg ved varierende krenkning. Senterskrog er også symmetrisk, med noe bunnreis og vertikale sider over tanktoppnivå for enkel utrustning av de aktre seksjoner. Generelt er det krav til intakt stabilitet som gir nødvendig fribord, oppdriftsgivende volum etc. og krav til skadestabilitet som definerer tanktopp og ellers vanntett seksjonering.



Figur 21: Trimaranskrog vist uten foilsystem

Hovedinndeling og seksjonering er illustrert i figur nedenfor:

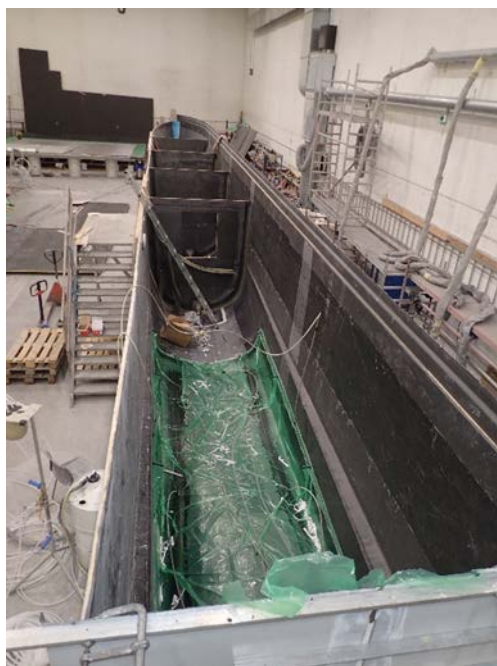


Figur 22: Hovedinndeling og seksjonering av konstruksjonen under hoveddekk

## 6.2 SKROGKONSTRUKSJON

Skroget er planlagt i karbonsandwich konstruksjon bygget opp med PVC skumkjerne og laminat av karbonfiber i venylester matrise på hver side. Slike sandwichpaneler er selvavstivende og trenger ikke annen avstivning mellom rammer, spant og skott. Sandwichpaneler benyttes for oppbygging av hud, dekk og skott. Rammer og spant bygges opp ved at en bjelkeformet kjerne belegges med laminat hvor topplate er spesielt forsterket som flens. Karbonfiber som benyttes leveres fra produsent som ferdige matter bygget opp med ensrettede fiber i multiaksiale sammensydde lag. Venylester er et egnet bindemiddel og velges av kvalitet og viskositet som også passer til valgte produksjonsmetode. En typisk karbonsandwich for en hurtigbåt består av 30 - 35 mm tykk PVC kjerne med 60 – 130 kg/m<sup>3</sup> densitet, dekt av laminat på 2 – 4 mm tykkelse på hver side, og avstives typisk hver 1½ meter.

Samtlige hoved konstruksjonselement som skrog, overbygg, og styrehus vakuumbstøpes i form som gir god overflatefinish. Tilsvarende panelproduksjon gjøres for dekk og skott. Spant og rammer prefabrikeres uten bruk av form. Et komposittverft vil typisk også prefabrikkere diverse standard konstruksjons- og utrustningsdetaljer som luker, mannhull, porter, master, etc. Sammenstilling av konstruksjonselementer gjøres i form av skjøter med overlapp som sikrer samme styrke som grunnmaterialet. Det ferdige resultatet er en sandwich konstruksjon av høy kvalitet, som generelt er godkjent av klasse og myndigheter, og representerer byggemateriale som klart gir laveste mulig skrogvekt for en hurtigbåt.

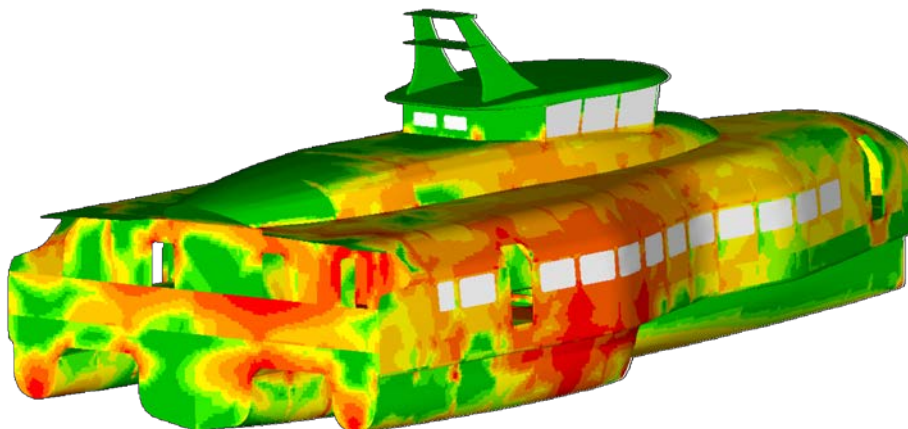


**Figur 23: Produksjon av karbonsandwich skrog**

Prosess for vakuumbstøping er at sandwich konstruksjon bestående av ytterlaminat, kjerne og innerlaminat legges tørt i form. Deretter lukkes konstruksjonen innunder en tett duk som forsegles lufttett til form. Fleksible plastrør fra venylester beholdere monteres jevnt over konstruksjonen, hvor det så etableres vakuum som suger venylesteret inn og væter den tørre sandwichkonstruksjonen. Væting av konstruksjon kan observeres gjennom duk og rør forsegles av etter hvert som venylesteret propagerer frem. Gjennomvæting av sandwichens to laminater sikres ved at kjerne er forberedt med spor og hull for distribusjon av venylester.

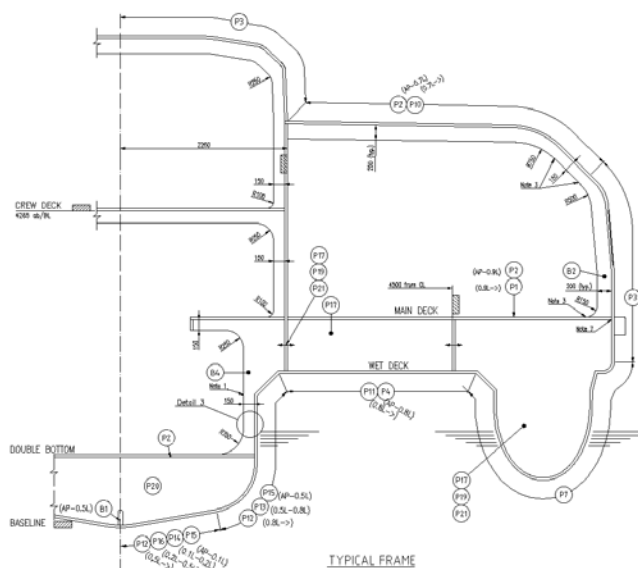
Dimensjonering og vekt optimalisering av skrog er utført ved bruk av FEA analyseverktøy. En globalmodell er etablert og analysert gjennom kombinasjoner av lokale og globale belastninger som klasseregelverket

beskriver. Spesielt for hydrofoilkonseptet er globalbelastninger i form av høye punktreaksjonskrefter inn i skroget gjennom struts. Det er også unikt for fartøyskonseptet at sjø og slamming i mindre grad slår på skroget når en er i fart. Det er i hovedsak benyttet materialer som nevnt tidligere i kapittelet, men alternativer som aluminium eller Nomex honeycomb og PMI type kjerner er også utredet brukt i overbygg for å kartlegge mulige vektbesparelser.



Figur 24: Global FEA modell av skrog m/overbygg

Hovedklasses tegninger som viser materialbruk og dimensjoner er etablert etter tradisjonell mal i AutoCAD programvare. I tillegg er hele konstruksjonen modellert i 3D Rhino med Excel eksport mal for å beregne skrogvekten med god presisjon, og for å være i stand til å etablere materiallister. Se figur nedenfor av midtspant:



Figur 25: Midtspant for Zeff 180-EL

Selv om oppnådd skrogvekt er lav, vil en vil fortsatt i prosessen videre gjennom prototyp bygging undersøke muligheter for å spare ytterligere vekt i konstruksjon og utrustning.

## 7. ENERGI- OG MASKINERIKONSEPT

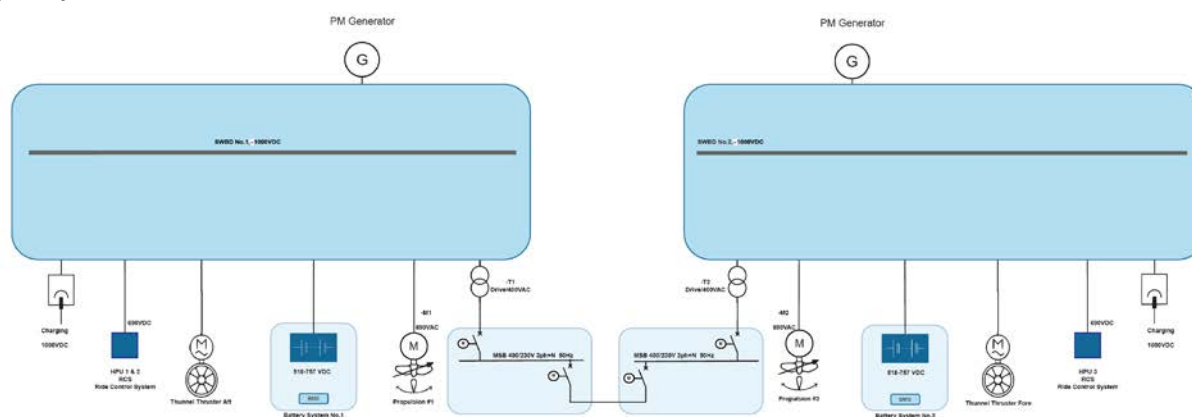
Det implementerte energi- og maskinerikonseptet er en plugg-in batteri-elektrisk løsning spesielt tilpasset hurtigbåter og de krav som der stilles til lav vekt og kompakthet. Løsningen er egnet for utslippsfri drift i høy hastighet for ruter med relativt lang distanse mellom endestopp, kombinert med høykapasitet landstrøm lading i hver ende. Løsningen er dimensjonert i henhold til en teoretisk konstruert og utfordrende operasjonsprofil som gjør at fartøyet med sine innebygde kapasiteter vil kunne dekke en rekke eksisterende ruter langs kysten vår som opereres med dieseldrevne hurtigbåter per i dag.

I tillegg til den batterielektriske løsningen er det inkludert to mindre dieseldrevne generatorsett som er spesielt tiltenkt en sakte fart «take home» funksjon om hovedsystem skulle feile. Generatorsettene kan også benyttes som rekkeviddeforlengere om en skulle over et strekk som utfordrer fartøys rekkevidde, eller som kilde for lading av batterier ved bortfall av strømnnett.

Energi- og maskinerikonseptet som herved presentert er formet etter de krav oppdragsgiver stiller til Fremtidens hurtigbåt – energieffektivt design. Tilpasning av kapasiteter og grensesnitt er mulig dersom en vurderer alternative ruter med særs ulik profil.

### 7.1 ELEKTRISK SYSTEMLØSNING

Det er lagt opp til en fullt ut redundant løsning for energilagring og kraftdistribusjon ombord i fartøyet slik som hurtigbåteregulverket krever. Dette i form av to uavhengige systemer som hver er tilknyttet sin halvdel av batterikapasiteten ombord, har hver sin hovedtavle og distribuerer hver kraft til propulsjon, hotell- og hjelpesystemer. For propulsjon og andre større forbrukere kan hvert delsystem kun levere til dedikert enhet mens kraft til hotell- og hjelpesystemer kan dekkes ut fra begge. I tillegg til batterilager er det dedikert en mindre dieselgenerator til hver av delsystemene, og landstrøm lading utføres gjennom en pluggløsning for hver halvdel. Hoved prinsipp er at fartøy skal ha nødvendig redundans når den er i operasjon.



Figur 26: Hoved kraftelektrisk enlinjeskjema fra Seam

De to hovedtavlene baserer seg på et såkalt DC-grid konsept med 1000V likestrømsspenning, vannkjøling, og hvor drive og omformere for hoved kraftforsyning og -forbrukere er integrert. De større forbrukere og kraftforsynere er arrangert direkte mot hovedtavle med hver sin individuelle tilkoping inkludert omformer/drive/bryter, mens andre forbrukere ombord forsynes fra egne vekselstrøms hovedtavler med 3-fase 400V til middels store forbrukere og 1-fase 230V til de små. Kraftforsynere inn på hver DC-grid hovedtavle er landstrøm, batteribank, og «take home» dieselgenerator. Større forbrukere som er koplet direkte til hovedtavle inkluderer hoved propulsjon, tunnellthrustere, og bevegelseskontrollsystem. DC-grid hovedtavler opererer separat uten mulighet for parallellkjøring (ingen lukket buss løsning) mens de

to vekselstrømstavelene kan operere enten separat fra hverandre eller sammenkoplet. I hvert av fartøyets to tavlerom er det plassert en DC-grid hovedtavle, en 400VAC transformator, og en 400/230VAC tavle.

En har som del av prosjektet undersøkt alternativer med distribuert og sentralisert elektrisk system. Sentralisert system med samlet hovedtavle og drives i ett «skap» er standardløsningen i skip, men det finnes kompakte og lette løsninger som er basert på distribuerte komponenter. Resultatet fra undersøkelsen var at distribuerte system ikke var tilstrekkelig attraktive for de effektstørrelser og kapasiteter som det her er behov for. Derfor ble det konkludert med et sentralisert prinsipp.

## 7.2 BATTERIER

Det kommer stadig nye batteriprodukter på markedet og vi har sammen med vår prosjektpartner Seam gjort en grundig gjennomgang spesielt rettet mot de ytelser og egenskaper en ønsker seg i dette prosjektet. Blant de topp tre vurderte produktene har en gjennom prosjektets gang erfart ett alternativ som fikk sin maritime godkjenning tilbaketrukket, ett nytt alternativ som har trukket seg fra det marine markedet, og ett annet nytt alternativ som er valgt i flere andre hurtigbåt byggeprosjekter (og som også vi har basert oss på). I tillegg har classeselskap revidert sine regelkrav med tilhørende implikasjoner på designløsninger.

Produktet vi har basert oss på er en kompakt vannkjølt enhet med relativt høy innkapslingsgrad, og med laveste spesifikk vekt (kg/kWt) som tilbys i markedet. Produktet kan karakteriseres som et energibatteri med relativt moderat C-rate kapasitet. Derfor er det krav til ladekapasitet som er dimensjonerende for installert batterikapasitet og hvor nødvendig effektuttak samt oppnådd rekkevidde utover oppdragsgivers minimumskrav kommer som et resultat av det. Leverandør av valgt batteriprodukt har også annonsert planer om å oppgradere produktet med ytterligere 30% kapasitet.

En vannkjølt batteriløsning som dette gir en hensiktsmessig installasjon for denne type fartøy. Vannkjøling gjøres med sjøvann som kilde (via sjøvann/ferskvann varmeveksler), det er ikke behov for voluminøs batterirom luftkondisjonering (som kreves for luftkjølte batterier), god innkapslingsgrad gjør at batteriene kan eksponeres høyere miljøpåkjønning, og batterirom kan arrangeres svært kompakt.

Selv om en benytter relativt sett lettvekts batteriløsninger representerer den installerte batterikapasiteten alene rundt 25% av fartøyets deplasement (lastet vekt) og hele den batterielektriske løsning representerer typisk over den doble vekten av tradisjonell dieselmekanisk løsning inkludert diesellagre ombord. Det er nettopp denne problemstillingen som gjør bruk av energieffektive skrog avgjørende for å kunne tilby attraktive batterielektriske hurtigbåtløsninger.

## 7.3 LADELØSNING

Landstrøm ladeløsning baseres på likestrøm hvor en unngår noen form for omformere om bord i fartøyet. Det betyr at løsning må finnes på kaisiden for omforming av høyspent vekselstrøm fra nett til likestrøm på plugg. Bygg for omformer på eller nær kai er nødvendig, eventuelt at dette bygges inn i en flytebyggeløsning som beskrevet tidligere. En likestrømløsning på kaisiden eller integrert i flytebrygge kan også være hensiktsmessig ved eventuell lav nettkapasitet og behov for bufferbatterier.

En baserer seg på manuell type ladeplugg som mannskap må håndtere. Erfaring viser at slike manuelle løsninger faktisk gir hurtigere oppkopling enn de automatiske alternativene. I tillegg krever manuelle plugg mindre vekt og volum, både om bord i fartøyet og på kaien. Det finnes nå tilgjengelig egnede plugg utviklet for tungtransportformål som har den nødvendige kapasitet og med ytterligere mulig fremtidig kapasitetsøkning. Typisk ser en for seg å henge pluggene opp i et enkelt tårn med utkrager mot

fartøy og eventuelt fjernstyrt kabelmating. Da vi her har behov for 2 plugger kan disse monteres sammen slik at det fortsatt blir en oppkoplingsoperasjon.



**Figur 27: Svingbart ladetårn med dobbel manuell plugg**

Ladeløsning arrangeres på fartøys akterdekk nær ett av hjørnene slik at det kan nås når både fartøy benytter hekkaneløp og sideaneløp. Alternativt, eller i tillegg kan det også arrangeres ladeløsning forut for bauganeløp. Dette må konkluderes basert på behov for den enkelte rute fartøy skal operere i. Generelt medfører hver ladeløsning betydelig vekt, ikke nødvendigvis pga. selve pluggen, men mer pga. kabler og oppkopling mot hovedtavle.

#### 7.4 PROPULSJON POD

Vår partner i prosjektet Servogear utvikler et elektrisk pod propulsjonskonsept spesielt tiltenkt for hurtigbåtindustrien gjennom et parallelt gående utviklingsløp. Produktet er planlagt i flere størrelser og utgaver, men utvikling av prototyp utgave er samkjørt med vårt prosjekt og tilpasset våre krav. Dette i form av en pod løsning på 1000 kW kapasitet tilrettelagt for innfesting mot foilsystem.

Den elektriske pod løsningen består av et torpedoformet hus med vribar propell i en av endene. Selve torpedoen inkluderer en høyhastighets permanentmagnet type elektromotor med spesielt lav diameter, et planetgir for reduksjon av turtall, samt et hydraulisk propellblad kontrollsystem. Direkte kjøling av elektromotor er mulig ved bruk av torpedoens overflateareal som varmeveksler mot sjø.

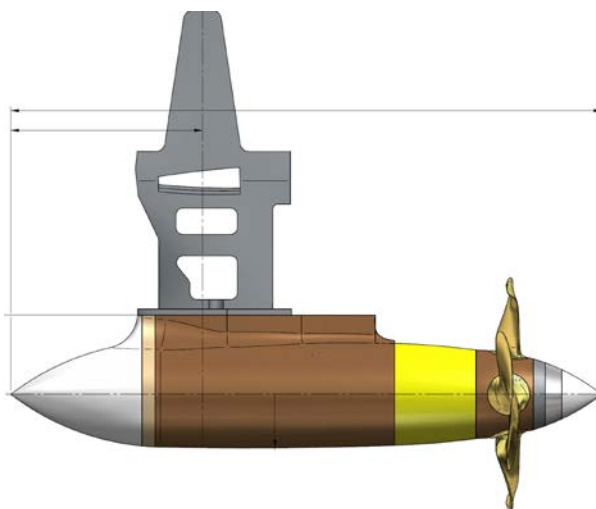
Vårt utgangspunkt var en løsning med trekkende propell da dette gir ren og uforstyrret innstrømning til propell og dermed de beste forhold for å oppnå høy propulsjonsvirkningsgrad. Men etter et omfattende CFD analyseprogram hvor effekt av propulsjon og hele foilsystemet ble inkludert viser det seg likevel at en slik løsning ikke er den optimale. Spesielt med såpass høy hastighet som 40 knop medfører akselerasjon av vannmasser over torpedo og foilsystem negative effekter, og en endte til slutt opp med en skyvende løsning som det beste alternativet.

Den elektriske propulsjon pod løsning er gunstig for et hydrofoilfartøy av flere årsaker. Som tidligere nevnt gir det mulighet for integrert løsning i foilsystemet. I tillegg har en elektrisk motor mulighet til å gi høyt effektuttak over et stort turtallsintervall, og kortvarig høyere effektuttak som kombinert kan utnyttes i en akselerasjonsfase hvor dette vil bidra til å løfte fartøy hurtig opp av vannet. Med vribare propellere kan en sikre stor skyvekraft fra lav til høy hastighet, og med batterier vil endring av lastpådrag være nær momentant.



Det skal installeres to stykk pod propulsjonsenheter. Monteringsgrensesnitt for pod er klargjort for bolteforbindelse i tillegg til kraftkabler, kontrollkabler og oljerør. Kabler og rør trekkes gjennom hulrom i de to aktre struttene, og enhetene boltes fast til metalleden av hydrofoilsystemet som tidligere beskrevet.

Produktet er vist i figur nedenfor:



Figur 28: ServoPOD løsningen for ZeFF

## 8. ANALYSER, BEREGNINGER, TESTER OG SIMULERINGER

Utvikling av design hjelpemidler har gått fremover siden Boeing utviklet hydrofoilfartøyer på 70-tallet, og siden Fjellstrand gjorde det samme på 90-tallet. Spesielt gjelder dette digitale simuleringsverktøy hvor vi i dette prosjektet har hatt helt andre muligheter. Gjennom America's Cup prosjekter er det utviklet spesialiserte simuleringsverktøy for utvikling av hydrofoilfartøy. Begrensningene modelltesting har for hydrofoilkonsepser kan nå i stor grad løses ved bruk av CFD simuleringsverktøy. De viktigste verktøy anvendt for utvikling av ZeFF 180-EL inkluderer:

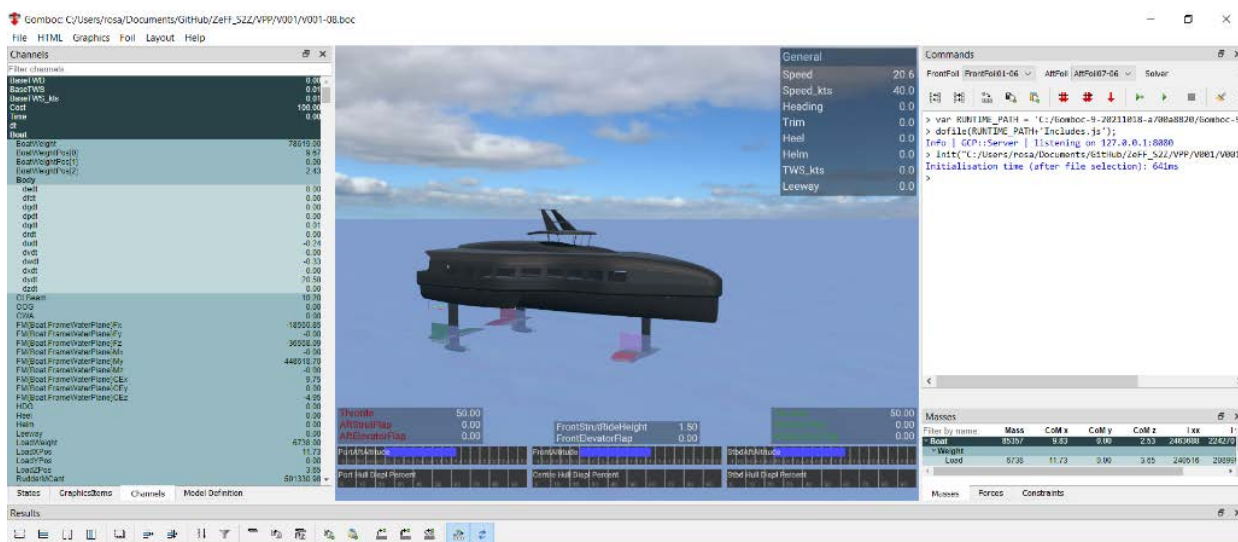
- Gomboc hydrofoil simuleringsverktøy (design, ytelse og bevegelsesanalyser)
- Finemarine og Star CCM+ (CFD simuleringsverktøy)
- Sintef Ocean kavitasjonstank (foil og propulsjon modelltesting)
- Rhinoceros/Excel mal (vekt- og tyngdepunktsberegning)
- Sofia and Nastran (komposittstruktur elementmetodeprogram)
- Hypet (stabilitet og hydrostatikk)

Oppsummering av de viktigste analyser, beregninger, tester og simuleringer som utført er beskrevet i påfølgende underkapitler.

### 8.1 MOTSTAND OG FREMDRIFT

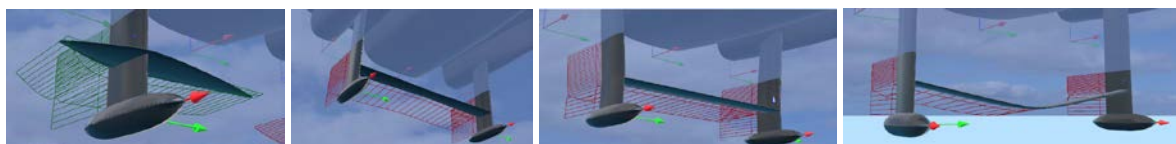
Prosjektet har anskaffet simuleringsverktøyet Gomboc fra Newzealandske SumToZero og benyttet dette til innledende design av foilkonseptet. Verktøyet er som nevnt opprinnelig utviklet for Americas Cup type hydrofoil seilbåter, men fungerer med diverse tilpasninger utmerket også for fartøy med propell fremdrift. Med denne programvare inkludert våre tilpasninger utført med assistanse fra andre brukere og

programvare utvikler, kunne en effektivt utføre innledende studier for å definere og sammenlikne ulike hydrofoilkonseppter. Et antall alternative konfigurasjoner er undersøkt og en optimal løsning er konkludert. Gomboc gir tilstrekkelig nøyaktighet for å verifisere forskjell i prestanda alternativer imellom, men verifiserende CFD analyser er nødvendig for endelig løsning.



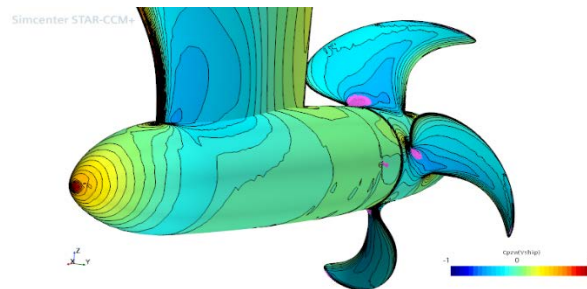
Figur 29: Printscren fra Gomboc simulering av ZeFF 180-EL

I innledende del av prosjektet ble det midlertidig konkludert en konfigurasjon bestående av tre stykk individuelle T-foil løsninger hvor hver av de to aktere hadde propulsjon integrert. En slik løsning (T-foiler akter) hadde diverse ulemper i form av mulig dynamisk ustabilitet (fluttering) med stor masse (propulsjon) montert på enden av en strut, samt at foilene stakk utenfor skrogets bredde. En H-foil løsning akter gjør at en unngår disse to ulempene, og H-foil løsningen gir i tillegg et gunstigere drag/løft forhold. Utfordring i utgangspunktet var å få løsningen med relativt lang foil strukturelt stabil, noe vi løste med kombinasjonen svak V-form og reduksjon av fartøys bredde.



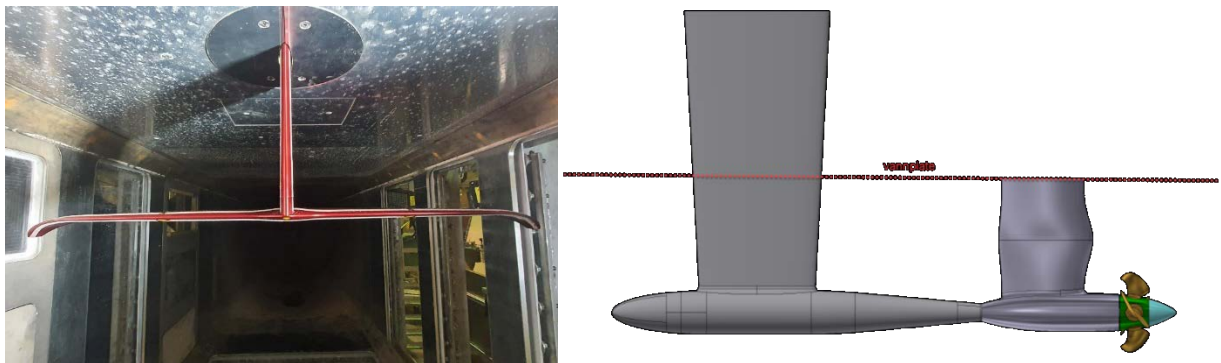
Figur 30: Iterasjonssteg for utvikling av aktere foilsystem

Innledende beregninger benyttet forenklete metoder fra tradisjonell vingeteori for bestemmelse av løft og drag. Dette ble deretter verifisert/korrigert med CFD beregninger først av individuelle foiler, deretter med hele foilsystemet inkludert, og til slutt også med propulsjon inkludert. Det ble utført forenklete vingeteori og CFD beregninger internt, samt CFD beregninger av Sintef Ocean. Ved detaljoptimalisering av foilsystemets geometri ble det fokusert på kavitasjon, hvor CFD var primærverktøyet. Spesielt geometri av sammenføyning mellom strut og foil viste seg utfordrende og en rekke alternativer ble undersøkt før vi kunne konkludere kavitasjonsfri løsning opp til og med fartøys topphastighet. Med CFD verktøyet ble det også undersøkt alternativ med skyvende og trekkende propell. Konklusjonen ble som nevnt en skyvende propell. Alternative propelldesign ble analysert for uttak av egnet løsning for dette fartøyet.



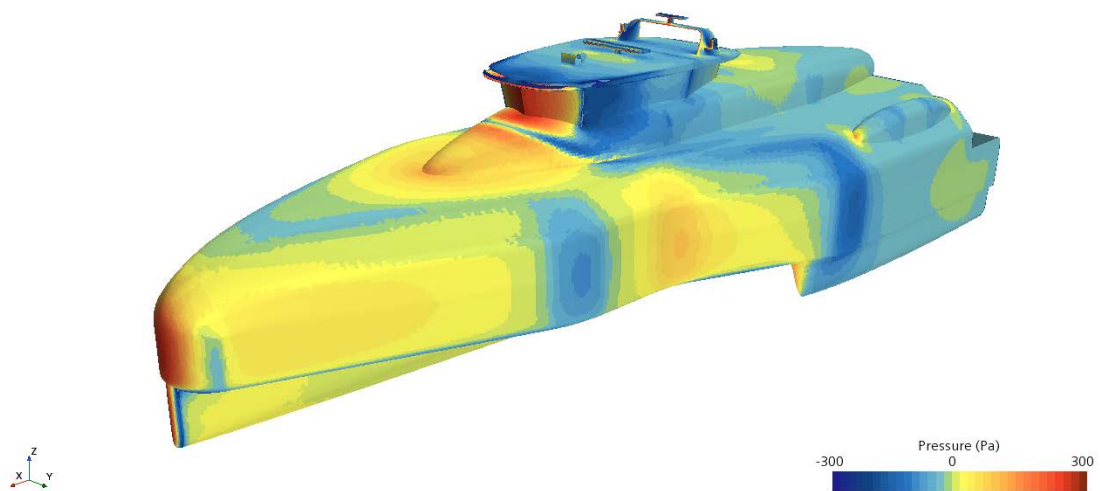
Figur 31: CFD analyse for skyvende pod løsning

I tidligere faser av Fremtidens hurtigbåt programmet ble det kjørt tradisjonelle slepetester av ZeFF konseptet i modelltank. Erfaringen fra disse tester er at skalering av resultater er mer utfordrende enn for tradisjonelle fartøy, og at slike tester har betydelig usikkerhet knytt til sine resultat. Gjennom dette prosjektet ble det kjørt tester av forre T-foil, og av propulsjon pod med deler av aktre foilsystem i kavitasjonstank. Testene ble utført med blandet suksess, spesielt hva gjelder skalering av løft/drag til fullskala verdier. Erfaringen vi sitter igjen med er at CFD er et mer effektivt designverktøy for foilsystem enn modelltester av den art som er utført innenfor prosjektet.



Figur 32: Kavitasjonstank test setup T-foil og pod

CFD beregninger er også kjørt av overbygg i løftet tilstand for å kartlegge luft- og vindmotstand.



Figur 33: CFD analyse for luft/vindmotstand

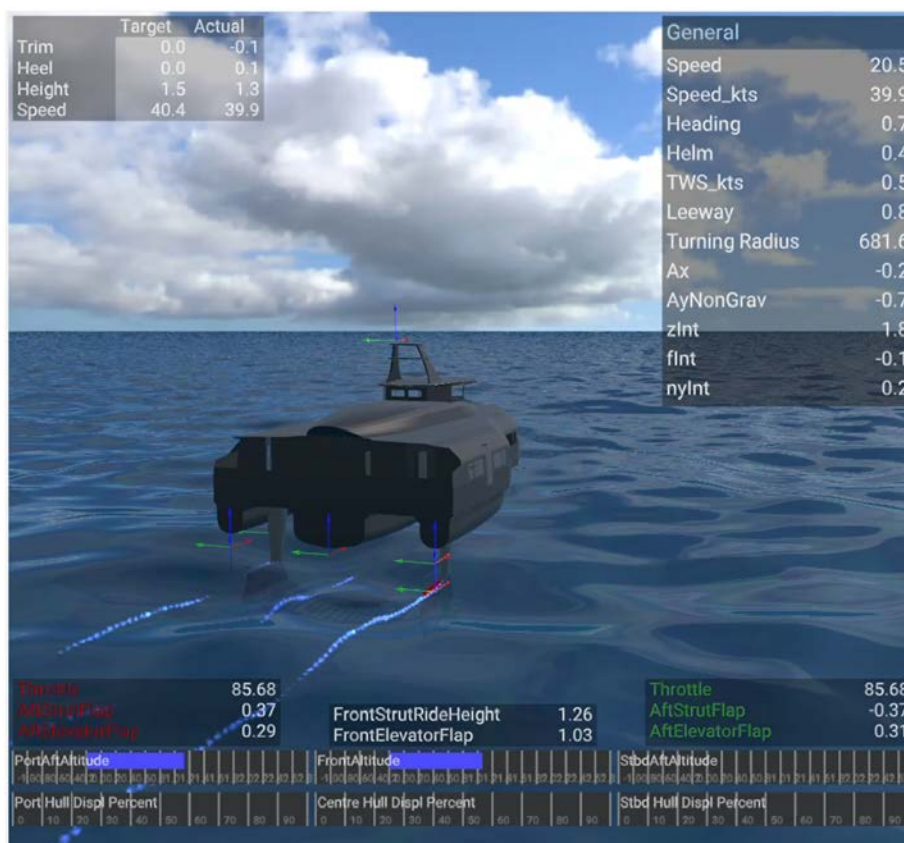
Simuleringer i Gomboc ble utført for å kartlegge motstandstillegg i sjø. Dette ble gjort for sjøtilstander fra stille vann og opp til 2,5 meter signifikant bølgehøyde i ulike bølgeretninger. Erfaringene er at tilleggsmotstand er minimal opp til moderate sjøtilstander, men at en for de høyeste sjøtilstander må

prioritere komfort for passasjerer og nødvendig neddykking av propellere fremfor lavest mulig motstand. Likevel, tilleggsmotstand i sjø for hydrofoilkonseptet er betydelig lavere enn deplasementsfartøy over hele det undersøkte spekteret av sjøtilstander. I tillegg til propulsjonseffekt legges det til effekt for bruk av bevegelseskontrollsystem for å definere det totale «motstandstillegget».

## 8.2 BEVEGELSE I SJØ OG PASSASJERKOMFORT

Omfattende simuleringer er utført for å optimalisere og verifisere fartøys bevegelse i sjø og tilhørende passasjerkomfort. Spesifikke passasjer komfortkrav som definert av IMO HCS regelverk er brukt som basis sammen med definert maksimal sjøtilstand for fartsområde 4. Simuleringsprogrammet Gomboc er brukt til dette formålet. Analysene inkluderer sjøtilstander opp til og med 2,5 meter signifikant bølgehøyde, alle bølgeretninger, for både langkammet og kortkammet sjø.

Ved utvikling av designet har en fokusert på å oppnå mulighet for å operere fartøyet i høy hastighet i grov sjø, og gjøre dette innenfor akseptable komfortgrenser for passasjerene om bord. Dette har vi klart å oppnå. Bevegelsesanalyser har vært hoved verktøy i den forbindelse og en rekke alternative løsninger hva gjelder foilkonfigurasjon, flaps/ror arrangement, strut dybde, og RCS software er utprøvd før konklusjon av løsning. Alternative konfigurasjoner som er utprøvd inkluderer ulike posisjoner og avstander mellom forre og aktre foilsystem, samt alternative løsninger hvor T-foil og H-foil er byttet om hverandre. Løsninger med flere flaps og ror enn konkludert er også undersøkt. Maksimal vinkelhastighet på flaps er anbefalt av leverandør. Dybde på struts er i hovedsak bestemt av hensyn til operasjon i sjø, og leverandør av bevegelseskontrollsystem har også benyttet Gomboc simuleringer som verktøy for tilpasning og optimalisering av sin software til dette fartøyet.



Figur 34: Bevegessimulering i Gomboc

Gjennom simuleringsarbeidet ble det identifisert og bekreftet av Gomboc utvikler at bølge partikkelhastighet er overpredikert for anvendt teori og må faktoriseres for å oppnå realistiske resultat. Slik faktorisering er utført med anbefalt nivå gitt av programvareutvikler, men det er også utført forenklete analyser i CFD for å bekrefte det samme. Vi er av den oppfatning at anvendt simuleringsverktøy er det beste som er tilgjengelig til formålet.

Modelltesting for verifisering av tilsvarende oppførsel i sjø krever en relativt stor fjernstyrt modell med integrert propulsjon og RCS system kjørt ute på fjorden. En slik modell medfører kostnader utenfor prosjektets budsjett, vil være mer av interesse for funksjonalitetstesting av RCS i intakt og skadet tilstand, og ikke nødvendigvis for verifisering mot passasjer komfortgrenser. Slike modelltester må eventuelt vurderes som del av detaljutvikling i et prototyp byggeprogram.

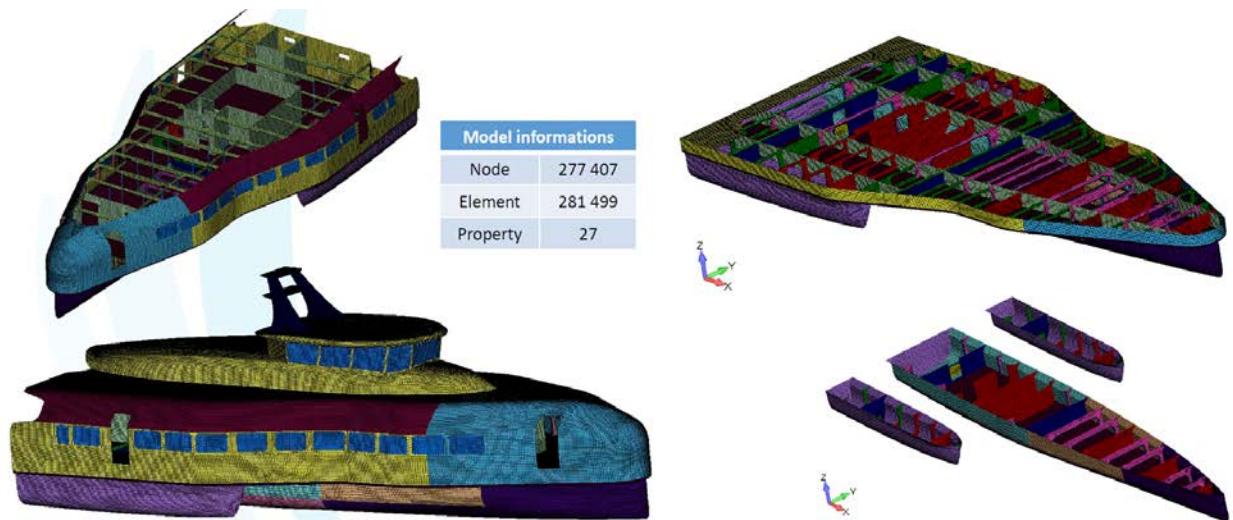
Simuleringer er utført i Gomboc også for verifikasjon av dynamisk stabilitet i ulike feiltilstander for foilsystemet, hvor hoved hensikt er å definere relevant «fail-to-safe» aksjon for RCS systemet. Verktøyet fungerer utmerket til dette formål og kan vurderes som alternativ til ovenfor nevnte modelltestprogram. IMO HSC regelverk krever omfattende undersøkelser for helhetlig kartlegging av feiltilstander med tilhørende korrigerende aksjoner gjennom FMEA analyse og testprogram. Dette arbeidet er startet som del av utviklingen og vil naturlig fullføres gjennom detaljdesign og testing som del av prototyp byggeprogram.

### 8.3 STABILITET OG FLYTESTILLING

Det er utført beregninger av hydrostatikk og stabilitet ved bruk av Hypet programvare. Her er flytestilling, samt intakt- og skadet stabilitet i deplasementsmode verifisert. Relevant bruk av regelverk er avklart med Sjøfartsdirektoratet. Konseptets skroglinjer (inkludert struts, foiler og podder) samt innvendig vannrett inndeling er modellert. Intern vannrett inndeling i form av dobbeltbunn og vannrette skott kommer som et resultat av skadestabilitetsberegninger. Beregninger viser at løsning som presentert tilfredsstillende alle gitte stabilitetskrav.

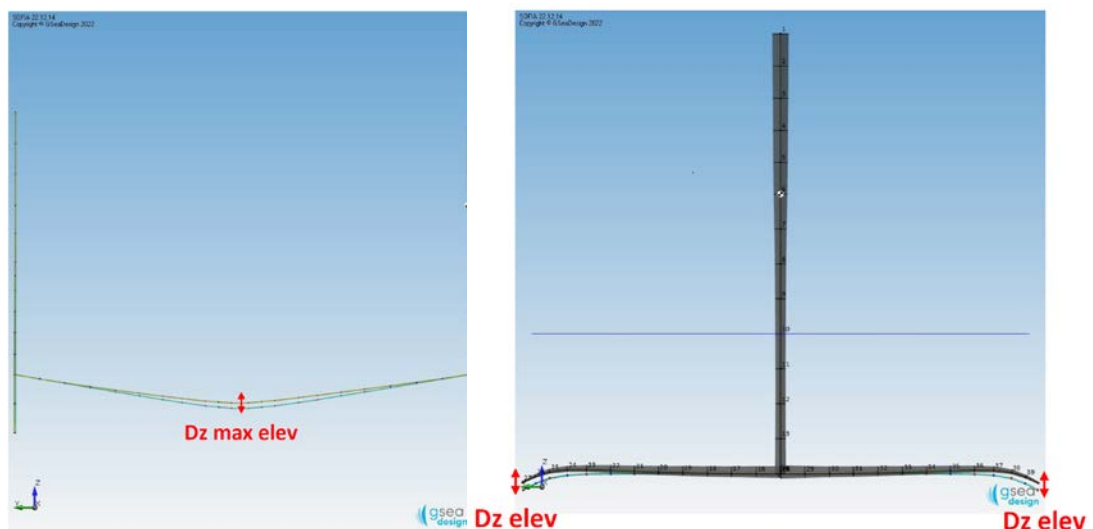
### 8.4 STYRKEBEREGNINGER

Det er utført omfattende styrkeberegninger ved bruk av elementmetodeprogrammer for optimalisering av skrog og foilsystem opp mot klasseselskaps krav (DNV HSLC regelverk). En globalmodell av skrog er etablert for å analysere lokale og globale belastninger, og for å definere egnet struktur som gir akseptable styrke. Styrkeberegning av skrog er utført etter tradisjonell metode og direkte etter anvisning fra regelverk. Spesielle vurdering er imidlertid gjort for foilsystemet og dets integrasjon i skrog, hvor egne lastkondisjoner er definert for å få riktige reaksjonskrefter og tilhørende globale skrogeffekter riktig representert.



Figur 35: FEA struktur globalmodell

For foilsystemet er programvare for elementmetode bjelketeori benyttet for overordnet dimensjonering, kombinert med detaljert 3D modellering av kritiske komponenter og deler av konstruksjonen. I tillegg til analyse av belastninger som forventes under normal drift er det utført omfattende analyser av ulike kollisjonsscenarioer hvor kollisjoner fra grunnberøring eller flytende legemer undersøkes (her har underleverandørs erfaring med foildimensjonering gitt stor verdi for prosjektet).



Figur 36: FEA modell foilsystem, defleksjoner

## 8.5 VEKT- OG TYNGDEPUNKTSBEREGNINGER

Det har blitt lagt ned mye arbeid i å vekt optimalisere og detaljberegne fartøyets lettskipsdata (vekt og tyngdepunkter). I analysene som gjennomført for å beregne fartøyets lettskipsdata har det blitt lagt til grunn material- og komponentvalg som gir et relativt lett fartøy, men som samtidig vil gi en god reiseopplevelse for passasjerene. Mange material- og komponentvalg er basert på en best mulig bruk av tilgjengelig hurtigbåtteknologi, mens andre mulige alternativer forutsetter innovasjon.

Lettskipsvekten er definert som vekten av et fartøy uten nyttelast, det vil si vekt av skroget og overbygningen, maskineri og utrustning. Da et fartøy sine lettskipsdata er bygget opp av mange forskjellige delkomponenter så er SFI-systemet på 3-sifret nivå benyttet for å kategorisere disse. For å

sikre god presisjon på vår vektberegning anvendes en 3D-modell bygget opp i Rhino programvare til å bestemme arealavhengige vekter som struktur (paneler, bjelker, søyler, innfestinger), maling, isolasjon, himling, gulvbelegg m/underlag, lettskott og større komponenter. 3D modellering gjøres i en mal hvor ulike element kan tilordnes materialverdier som deretter kan eksporteres ut på Excel format.

Den fulle vekt- og tyngdepunktberegningen gjøres i vår Excel mal som inkluderer alle systemer og komponenter om bord og er helhetlig detaljert ned til 3-sifret SFI nivå inkludert tyngdepunkt og tregghet i alle frihetsgrader. Beregning er i de tilfeller utstyr ikke er valgt basert på vekter av typisk utstyr som vi har hentet fra leverandører og/eller våre egne arkiver. Det er tilegnet marginer for design og bygging av fartøyet som tilpasses prosjektets modenhet. Marginene er ment å representere usikkerhet som gradvis vil bli redusert etter hvert som beregninger ytterligere detaljeres, utstyr bekreftes, og vekter måles.

## 9. KONKLUSJON

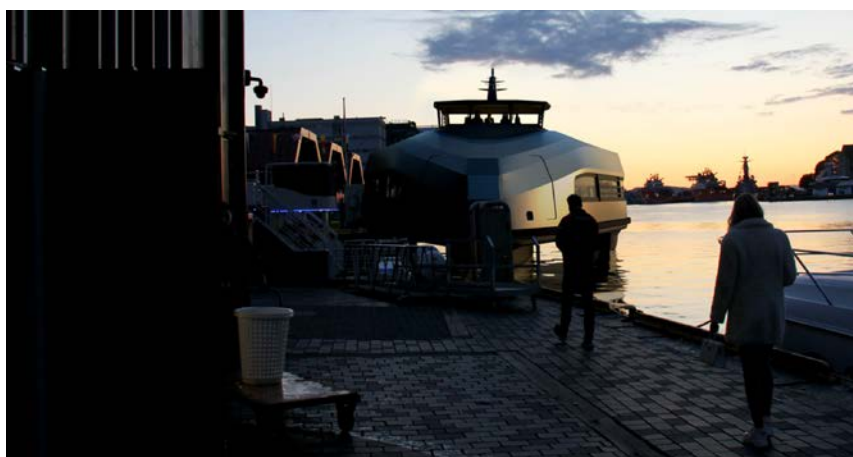
Prosjektet Fremtidens hurtigbåt – energieffektivt design ble initiert av oppdragsgiver for å dekke et fremtidig behov for utslippsfrie hurtigbåter som markedet ikke tilbyr per i dag. Målsetningen er å utvikle, bygge, og verifisere et utslippsfritt og energieffektivt hurtigbåtkonsept som oppfyller krav til fart, rekkevidde, og frekvens relevant for typiske ruter langs kysten. Vårt forslag til prosjektet var et batterielektrisk hydrofoilkonsept med høyt energieffektivt potensial, men som også har en høy terskel med tilhørende omfattende utviklingsarbeid for å nå kommersialisering. Utvikling av konseptet ville ikke bli gjort uten støtte fra prosjektet, og resultatet vi nå presenterer bekrefter potensialet – utslippsfrie løsninger som ivaretar krav til hastighet, rekkevidde, og frekvens for hurtigbåtdrift langs kysten vår kan med dette realiseres.

Med ZeFF 180-EL oppnås egenskaper som ikke er gjennomførbare med basis i konvensjonelle skrogløsninger. Ikke bare oppnår vi utslippsfri hurtigbåtdrift, vi får «på kjøpet» egenskaper som kan øke hurtigbåtens popularitet som kollektivtransportmiddel gjennom en forbedret reiseopplevelse, inkludert:

- Redusert reisetid
- Stillestående fartøy
- Forbedret passasjerkomfort
- Holder ruten i dårlig vær

Reisetid kan reduseres betydelig med fartsøkning fra typisk 55 til 75 km/t. Erstatte man dieselmotorer med batterier fjernes motorstøyen, og løfter man skroget opp så forsvinner også støy fra bølgeslag. Uten bølgeslag vil heller ikke passasjerene erfare samme vibrasjoner og sjøsyketendenser som før, selv om fartøyet kan holde farten oppe på uværsdager. Kombinerer man dette med gode løsninger for universell utforming, tilpasning av passasjerfasiliteter etter behov, service- og underholdning om bord ser vi konturene av hurtigbåten som en populær klimavennlig løsning som vil fortsette å knytte kysten vår sammen i årene som kommer.

ZeFF 180-EL konseptet og varianter av denne med tilpasset passasjerkapasitet vil med sin kombinasjon av fart og rekkevidde passe inn i mange hurtigbåtsamband langs kysten uten at en trenger å gå på kompromiss med rutetabellen. Konseptet er basert på nye kombinasjoner av teknologi som finnes per i dag, og nå ferdig utviklet med byggespesifikasjon, kontrollert av classeselskap, og klar til bygging og endelig fullskala verifikasjon.



Figur 37: ZeFF «by night»