

Lars Vestnes Larsen
Hans Jørgen Sveen

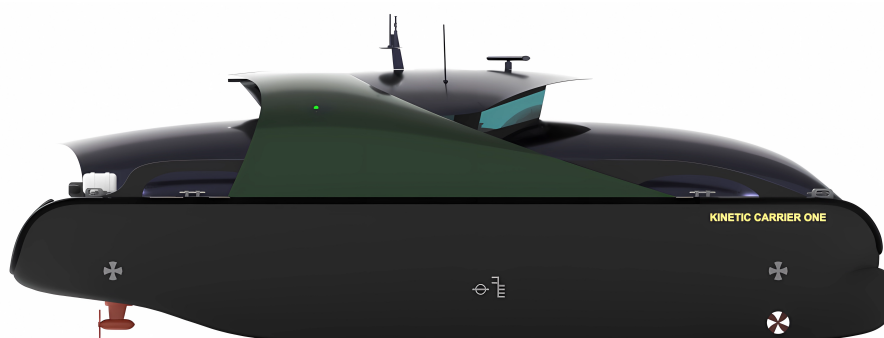
Prosjektering av en nullutslipps energifrakter for turisme i Geirangerfjorden

En del av Grønn Kai prosjektet

Bacheloroppgave i Skipsdesign

Veileder: Lars Erik Nygård

Mai 2023



Lars Vestnes Larsen
Hans Jørgen Sveen

Prosjektering av en nullutslipps energifrakter for turisme i Geirangerfjorden

En del av Grønn Kai prosjektet

Bacheloroppgave i Skipsdesign
Veileder: Lars Erik Nygård
Mai 2023

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for havromsoperasjoner og byggteknikk



Kunnskap for en bedre verden

Forord

Det er med stor takknemlighet at vi presenterer denne bacheloroppgaven, som er resultatet av flere måneders intensivt arbeid og dedikasjon. Vi ønsker å benytte denne anledningen til å takke alle som har bidratt til å gjøre dette prosjektet mulig.

Først og fremst vil vi rette en stor takk til vår veileder, Lars Erik Nygård. Vi vil også rette en stor takk til Karl Henning Halse for konstruktiv veiledning underveis. Deres kunnskap og erfaring har vært verdifullt for oss gjennom hele prosessen. Dere har utfordret våre ideer og bidratt til å utvikle vårt faglige fundament. Vi er veldig takknemlige for deres tid og prioritet.

Videre vil vi takke Irina-Emily Hansen i Grønn Kai prosjektet for tilbudet om en så bred og givende oppgave, Henrique Gaspar for rådgiving i prosjektering og rapportstruktur, Øivind Kåre Kjerstad for kunnskap om energibærere og maskineri, Arne Jan Sollid for givende diskusjon om materialvalg og tekniske løsninger, Lars Petter Bryne og Andreas Knotten Dahl for assistanse i å produsere våre innviklede modeller til slepetankforsøk, og til slutt Anders Madsen for innføring i et nytt og ukjent regelverk fra DNV. Deres ekspertise, råd og konstruktive tilbakemeldinger har vært avgjørende for å utvikle våre ferdigheter og styrke vår forståelse innenfor dette fagområdet.

Til slutt ønsker vi å takke våre nærmeste venner og familie for deres ubetingede støtte og oppmuntring gjennom hele studieperioden. Deres tro på oss har vært en kontinuerlig motivasjonskilde, og vi er takknemlige for at dere alltid har vært der for å lytte, støtte og oppmuntre oss.

Vi er enormt takknemlige for tre utfordrende og lærerike år. Tiden på NTNU har utviklet oss stort, og vi har tilegnet oss enestående kunnskaper innenfor fagfeltet vi brenner for. Vi håper vi kan sette vårt merke på verden med denne verdifulle lasten NTNU har gitt oss.

Mai 2023, Ålesund



Lars Vestnes Larsen



Hans Jørgen Sveen

Sammendrag

I denne oppgaven prosjekteres en energifrakter for å tilrettelegge verdensarvfjorden, Geirangerfjord, i arbeidet med å elektrifisere turistnæringen. Fra 2026 skal all passasjertransport i verdensarvfjordene være utslippsfri. En energifrakter er blitt prosjektert som en løsning. Oppgaven er en del av ”Grønn Kai“-prosjektet ved NTNU. Rapporten fokuserer på å finne en alternativ energidistribusjon i påvente en permanent løsning. Gjennom bruk av kjente designmetoder, praktiske forsøk og moderne programvare har arbeidet resultert i et attraktivt skip med et katamaranskrog. En sentral del av oppgaven er å redusere overflødig energiforbruk, valg av energibærer og energilagerets størrelse.

Rapporten konkluderer med at en energifrakter med et 13,5 megawattimer energilager vil kunne dekke energibehovet til turistbåtene i Geiranger, samtidig som det sikrer bærekraftig strømforsyning og nullutslippsdrift. Det funksjonelle designet er basert på grundige analyser, og skrogformen sikrer energieffektiv fremdrift. Den lokale slepetanken ved NTNU Campus Ålesund er benyttet til praktisk slepeforsøk. Det er også utviklet et visuelt attraktivt design.

Det konkluderes med bruken av svinghjul som en ideell energibærer, med sin kompakte størrelse og evne til å håndtere rask energioverføring på høy effekt. Praktisk testing i slepetank, med to versjoner, har konkludert med bruk av bulb. Hvor en besparelse inntil 15 % ble målt til sammenlikning med skrogform uten. Aktuell programvare har sikret at stabilitet og strukturell integritet overholder gjeldende krav og regler. Et 3D-program er benyttet for å utvikle og designe hele fartøyet. Konklusjonen er at en energifrakter vil kunne løse problemet med energimangel og at det foreslåtte designet er et pålitelig konsept.

Rapporten inneholder også teknisk dokumentasjon med utgangspunkt i bransjens standarder. Arbeidet er kvalitetssikret gjennom praktiske tester og bruk av moderne programvare, som har bidratt til pålitelige resultater og bekreftet designets effektivitet. I helhet vil en energifrakter være relevant for fremtidig bærekraftig skipsfart og energidistribusjon. Rapporten gir et grundig sammendrag av arbeidet og dets konklusjoner.

Abstract

In this task, an energy freighter is being designed to facilitate the UNESCO World Heritage fjord, Geirangerfjord, in the effort to electrify the tourism industry. From 2026, all passenger transport in the world heritage fjords must be emission-free. An energy freighter has been designed as a solution. The task is part of the "Grønn Kai" project at NTNU (Norwegian University of Science and Technology). The report focuses on finding an alternative energy distribution while waiting for a permanent solution. Through the use of established design methods, practical experiments, and modern software, the work has resulted in an attractive ship with a catamaran hull. A central aspect of the task is to reduce excessive energy consumption, choose an energy carrier, and determine the size of the energy storage system.

The report concludes that an energy freighter with a 13.5 megawatt-hour energy storage system would be able to meet the energy needs of tourist boats in Geiranger, while ensuring sustainable power supply and zero-emission operation. The functional design is based on thorough analyses, and the hull shape ensures energy-efficient propulsion. The local towing tank at NTNU Campus Ålesund was used for practical towing experiments. A visually appealing design has also been developed.

The use of flywheels is concluded as an ideal energy carrier, due to their compact size and ability to handle rapid power transfer at high efficiency. Practical testing in the towing tank, with two versions, concluded the use of a bulb, which resulted in up to a 15 % savings compared to a hull form without it. Relevant software has ensured that stability and structural integrity meet current requirements and regulations. A 3D program was used to develop and design the entire vessel. The conclusion is that an energy freighter would be able to solve the energy shortage problem, and the proposed design is a reliable concept.

The report also includes technical documentation based on industry standards. The work has been quality assured through practical tests and the use of modern software, which has contributed to reliable results and confirmed the effectiveness of the design. Overall, an energy freighter would be relevant for future sustainable shipping and energy distribution. The report provides a comprehensive summary of the work and its conclusions.

Forklaringer

Symbolliste

- α_{avg} = Gjennomsnittlig vinkelaksele-
rasjon
- A = Areal
- A_s = Projesert areal over vannlinje
- b = Avstand mellom hvert halvskrogs
senterlinje
- B = Total bredde av fartøy
- B_1 = Forflyttet oppdriftsenter av
fartøy ved krengeing
- B_{tn} = Tunnelbredde av fartøy
- B_{wl} = Vannlinjebredde av fartøy
- C = Bulekonstant
- C_A = Correlation allowance
- C_{AAS} = Luftfotmstandskoeffisient
- C_b = Blokkoeffisient av fartøy
- C_D = Dragkoeffisient
- C_F = Friksjonsmotstandskoeffisient
- C_R = Restmotstandskoeffisient
- C_T = Totalmotstandskoeffisient
- C_w = Bølgekoeffisient fra DNV
- D = Dybde i riss av fartøy
- Δ = Deplasement av fartøy
- ΔC_F = Roughness allowance
- ΔV = Hastighetskorreksjon
- E = Elastisitetmodulen
- η_0 = Virkningsgrad propell
- η_{EL} = Virkningsgrad elektrisk motor
- η_{ES} = Virkningsgrad energilager
- η_{tot} = Virkningsgrad total
- f1 = Materialfaktor
- f_D = Dynamikkfaktor
- Fn = Froudetall
- g = Tyngdekraftsakselerasjon
- G = Tyngepunkt av fartøy
- GM = Metasenterhøyde av fartøy
- GZ = Armlengde av fartøys rettende
moment
- I = Annet arealmoment
- I_s = Steiners Sats
- I_t = Rotors treghetsmoment
- k_s = Overflateruhet
- K = Kjøl av fartøy
- KB = Avstand mellom fartøys kjøl og
oppdriftsenter
- KM = Avstand mellom fartøys kjøl og
metasenteret
- l = Bæreravstand
- L = Lengde av fartøy
- ν = Viskositet
- m = Masse
- M_s = Tverrskipsmoment fra DNV
- M_{sw} = Langskips-stillevannsmoment
fra DNV
- M_w = Langskips-bølgemoment fra
DNV
- ω_x = Vinkelhastighet til gjeldende ro-
terende masse
- P = Effekt
- PB = Effekt ut fra energilager
- q_{dim} = Linjelast på bærerramme
- Q = Vrimoment
- ρ = Massetetthet til sjøvann
- r = Avstand fra fartøys senterlinje til
arealsenter av enkeltskrog
- RN = Reynoldstall
- R_{Tm} = Totalmotstand modell
- R_{Ts} = Totalmostand skip
- s = Stiveravstand
- S = Våt overflate
- σ_{EULER} = Bulekapasitet for gjeldende
platefelt
- σ_x = Spenning for gjeldende tverrsnitt
- t = Platetykkelse
- t_s = Tid i sekunder
- T = Dypgang av fartøy
- ν = Poissons forhold
- V = Hastighet i knop
- Z = Punktet vinkelrett fra fartøyets G
på linjen mellom M og B_1
- Z_x = Motstandsmoment for gjeldende
tverrsnitt

Begrepsliste

- AP = Akterlig perpendikular (Aft Perpendicular)
- AI = Kunstig intelligens (Artificial Intelligence)
- CO_2 = Karbondioksid-gass (Carbon dioxide)
- COG = Sann kurs (Course Over Ground)
- CPP = Kontrollerbar pitch propell (Controllable Pitch Propeller)
- D6 = Sertifikat for føring av fartøy opp til 24 meter LOA og 500 bruttotonn
- Demihull = En av to enkeltskrog til et katamaranskrog
- DNV = Det Norske Veritas
- DP = Dynamisk Posisjonering
- FESS = Svinghjulenergilager (Flywheel Energy Storage System)
- FP = Fremre perpendikular (Front Perpendicular)
- FPP = Fast pitch propell (Fixed Pitch Propeller)
- GA = Generalarrangement (General Arrangement)
- GPS = Global Positioning System
- HSC = High Speed Craft
- HSLC = High Speed and Light Craft
- IMO = International Maritime Organization
- ISO = International Organization for Standardization
- ITTC = International Towing Tank Conference
- LCB = Langsskipsoppdriftsenter (Longitudinal Center of Bouyancy)
- LCG = Langsskipstygdesenter (Longitudinal Center of Gravity)
- LIDAR = Light Detection And Ranging
- LNG = Flytende naturgass (Liquid Natural Gas)
- LOA = Totallengde (Length overall)
- Lpp = Lengde mellom perpendikularene (Length between Perpendiculars)
- Lwl = Vannlinjelengde (Length Water Line)
- Monohull = Tradisjonelt enkeltskrog
- MSI = Sjøsykeindeks (Motion Sickness Index)
- NOK = Norske Kroner
- NO_x = Nitrogenoksid-gasser (Nitrogen oxide gasses)
- Power Barge = Flytende energilager
- Power Freighter = Lasteskip med energilagringensheter
- RADAR = Radio Detection And Ranging
- RAO = Response Amplitude Operator
- SO_x = Sveloksid-gasser (Sulfur oxide gasses)
- SWATH = Small Waterplane Area Twin Hull
- SOLAS = Safety of Life at Sea
- TCG = Tverrgående tyngesenter (Transverse Center of Gravity)
- VCG = Vertikale tyngdepunkt (Vertical Center of Gravity)

Programliste

Programvare fra McNeel



Rhinoceros 3D er et 3D-modelleringsprogram som brukes i designprosesser innen arkitektur, design, produktutvikling og andre bransjer som krever komplekse 3D-modeller. Programmet innehar en rekke verktøy for å lage, redigere og visualisere 3D-geometri, og kan også brukes til å utføre analyser av konstruksjoner og materialer. Rhino er allsidig og støtter mange filformater som kan integrere og samkjøre flere elementer fra skipsdesignprosessen i ett program. Dette gjelder godt samsvar med Maxsurf-programvaren og AutoCAD. Det er brukt Rhino 7 under arbeidet til å lage nøyaktige modeller av fartøyet.

Programvare fra Bentley Engineering



Maxsurf 19 V8i er en maritim designprogramvare som brukes til å lage og evaluere skrogdesign. Programmet har verktøy for 3D-modellering, skipstekniske beregninger og dynamiske analyser. Programpakken er utviklet til generell skipsdesign og maritim arkitektur. Programmet er en del av Bentley Systems-familien. Under er en oversikt over programmene brukt under oppgaven.



Maxsurf Modeler Advanced benyttes til skrogutforming og til å fastsette rammebetingelsene for videre analyser. Programmet tillater redigeringer på modellen hentet ut fra Rhino, og kan forberedes til videre analyser og beregninger.



Maxsurf Stability Advanced benyttes til å gjøre stabilitetsberegninger og likevektsanalyser. Dette gir nødvendig dokumentasjon på GM, GZ-kurve og opptredende momenter i skrogbjelken når vekter og laster er lagt inn i programmet.



Maxsurf Resistance gir empiriske analyser av skrogmotstand med flere tilgjengelige metoder. Slender Body metoden for katamaraner er tilgjengelig i programmet. Numeriske analyser av bølgemønstre er også tilgjengelig i dette programmet.





Maxsurf Motions Advanced er brukt i enkle trekk for å se på skipets karakteristikk. Programmet inneholder et større bibliotek av bølgespekter og sjøkondisjoner som benyttes til å analysere skrogets sjødyktighet. RAO-karakteristikk er også hentet ut fra denne programvaren.


Programvare fra Autodesk

A AutoCAD er et teknisk tegneprogram som brukes til å lage 2D-tegninger, skjematiske diagrammer og teknisk dokumentasjon. Programmet er utbredt i mange ingeniørfaglige bransjer, og er svært relevant innenfor skipskonstruksjon. I maritim industri er AutoCAD ofte brukt til å lage tekniske tegninger og dokumentasjon til klasseselskap. Programmet er brukt tilsvarende i denne oppgaven. Det er brukt AutoCAD 2023 under arbeidet.

Programvare fra DNV

 Klaseselskapet DNVs programpakke er utviklet for effektivt skipsdesign i henhold til deres regelverk. DNV har utviklet en rekke programmer som forenkler designprosessen. Av aktuell programvare kan globale og lokale strukturanalyser utføres. Klaseselskapet har også en rekke andre programvare til andre bruksområder i skipsdesign. Under er en oversikt over programmene brukt under oppgaven.

 Nauticus Hull er et program utviklet av DNV som brukes til strukturberegning av skipsskrog. Programmet er til for å utføre analyser av skrogstruktur, og verifisering av design i henhold til regelverket. Programmet beregner spenninger og analyserer skrogstyrke. Det er bruk Nauticus Hull 64 v20.19.2201 under arbeidet.

 3D-Beam er et strukturprogram fra DNV som tillater enkel modellering og analysering av bjelkestrukturer i 3D. Programmet kan integreres med Nauticus Hull, eller utnyttes til andre bruksområder. Programmet gir enkle og raske analyser av kraftgang, spenninger og bulekontroll. Det er brukt 3D-Beam v20.19 under arbeidet.

Prosjektbeskrivelse og Kravspesifikasjon

Prosjektbeskrivelse SKID2900 Bacheloroppgave Skipsdesign

Instituttet for havromsoperasjoner og byggteknikk, Ålesund



Lars Vestnes Larsen og Hans Jørgen Sveen

Vår 2023

Prosjektering av energilagings-fartøy

Geirangerfjorden på Sunnmøre er Norges mest besøkte destinasjon med cruiseskip, med 344 anløp i 2019. Det vil det være krav fra 2026 at alle fartøy som beveger seg inn i verdensarvområdet i Geirangerfjorden skal være utslippsfrie. Det vil si at fartøyene har null utslipp av klimagasser som CO₂, NO_x, og SO_x inne i fjorden. Topografien i Geirangerfjorden i værkondisjoner med lite vind gjør at ansamling av utslippsgasser fra skipstrafikk forverrer luftkvaliteten i fjorden drastisk. Dette vernetiltaket er dermed med på å forbedre luftkvaliteten i fjorden for å ivareta lokalsamfunnet og naturen.

Løsningen for turistnæringen blir å flytte besøkende fra cruiseskipene over til mindre utslippsfrie passasjerbåter som tar de resten av veien inn til Geirangerfjorden. Disse passasjerbåtene vil da kreve lademuligheter i Geiranger, men tettstedet mangler et strømnett dimensjonert for hurtiglading av maritime fartøy. Den foreslåtte løsningen er å designe et fartøy som kan fungere som energilager lastet med batterier eller lignende energilagring. Dette fartøyet skal da kunne gå med egen fremdrift til en nærliggende lokasjon hvor den kan lades opp, og så flytte seg til Geiranger for å fungere som ladestasjon til passasjerbåtene. På sikt skal denne infrastrukturen være autonom.

Kandidatene skal utføre følgende oppgaver i prosjektet, og repetere prosessen 2 til 3 ganger (Designspiralen) for å finne de beste kompromissene i designet:

1. Vurdere resultat fra «Grønn Kai»-rapport og avgjøre nødvendig kapasitet av last. Gjøre analyser på batteri og andre alternativer som energibærere.
2. Litteraturstudie
3. Etablere hoveddimensjoner basert på egne analyser hvor regelverk og kapasitet oppfylles. Skrogtype skal velges ut fra nødvendig deplasement, begrensinger i hoveddimensjoner, og fartsområde.
4. Etablere GA og vektestimater gjennom kjente prosjekteringsmetoder sammen med valg av materialer.
5. Bruke GA til å dimensjonere et skrog et med tilstrekkelig styrke iht. regelverk. (Lokal- og globalstyrke)
6. Gjøre egne vurderinger rundt valg av fremdriftssystem og utrede skipets egenskaper for autonom drift.
7. Utføre praktiske slepeforsøk av skrog for verifisering av skrogtype og hoveddimensjoner. (Eventuelt andre praktiske tester om tiden tillater det)

8. Fremstille et endelig design med nødvendig utstyr og egenskaper. Implementering av automatisk fortøyningssystem. Etablere en visuell profil.

Veileder ved NTNU Ålesund er Lars Erik Nygård, og kandidatene vil også oppsøke veiledning fra øvrige fagpersoner og næringsliv.

Endelig rapport vil formuleres som en teknisk rapport på norsk bokmål. Teksten skal inneholde innholdsfortegnelse, litteraturliste, konklusjon, og tydelig henvisninger til tabeller og figurer.

Lars Vestnes Larsen og Hans Jørgen Sveen

Vår 2023

Kravspesifikasjon energilagings-fartøy

Operasjonsområde

Fartøyet skal være kompatibelt med en rekke fartsområder, men skal i dette prosjektet dimensjoneres for å gå i Storfjorden mellom Stranda, Valdalen, og Geiranger.

Sertifisering

Fartøyet vil ikke frakte annet personell enn eget mannskap, og vil ikke være utstyrt for annet enn å frakte fastmonterte energilagingsenheter. Dermed kan det sertifiseres som lite lasteskip. For å holde seg innenfor krav som forenkler konstruksjon og drift, vil fartøyet holdes under 24 meter LOA og under 500 bruttotonn for at skipsfører ikke skal trenge høyere sertifikat enn D6.

Hoveddimensjoner

Det er ingen av hoveddimensjoner som opplever strenge krav for driften av fartøyet i det bestemte området, annet et fortøyningssteder. Det er ikke sannsynlig at fartøyets dypgang eller lengde vil strekkes lengre enn området sine begrensinger. Dermed står valg av hoveddimensjon åpent.

Lagringskapasitet

Fartøyet skal kunne gi minimum 4 ladninger til passasjerbåtene som skal gå i området i løpet av en dag. Det skal også bruke lagringskapasiteten til egen fremdrift, og vil derfor krever nok energi til å utføre sin daglige rute på max motorytelse om nødvendig. En sikkerhetsmargin på 10% skal også legges til.

Fremdrift og hastighet

Fartøyet skal designes for å kunne konverteres til autonom navigasjon og ubemannet drift på sikt, og vil derfor kreve plass til tilhørende sensorer og systems. Manøvreringsegenskapene må være svært gode for at fartøyet kan lett kontrolleres av datasytem under alle situasjoner og vær- og sjø-kondisjoner. Det er ikke et spesielt krav til hastighet, annet enn at fartøyet skal kunne bevege seg mellom Geiranger og tettsteder lenger opp i Storfjorden som Stranda og Valdalen innen 3.5 timer. Dette vil kreve at fartøyet kan holde en SOG (Speed over ground) på minimum 7 knop.

Visuell profil

Fartøyet skal omgås omgivelser som er et populært fotomotiv, og derfor settes det store krav til estetisk utseende. Som en del av en unik infrastruktur skal fartøyet kunne ta seg godt både når det ligger til kai, og ute på fjorden.

Nullutslipp

Fartøyet skal gå i en sone som har krav om nullutslipp, så derfor skal det drives elektrisk. For å følge

regelverk for sikkerhet og nød-energikilde vil det bli utstyrt med en dieselgenerator som vil kunne nok effekt til å drive fartøyet i en lav hastighet og forsyne kritiske system med strøm. Dette skal ikke brukes i daglig drift, men bare under nødsituasjoner hvor fartøyets hovedenergikilde er ute av drift.

Sesongbruk

Fartøyet er designet for en bruksprofil som er sesongbasert hvor det er lite behov for det på vintertid. Da kan fartøyet brukes til å andre formål som mobil energilagring. Enten å supplere bebyggelse, industri eller anlegg som har høyere strømforbruk enn lokalt strømnnett er dimensjonert for, eller som midlertidig energilager for mer strategisk bruk av strøm med vekslende strømpriser gjennom døgnet. Altså ta strøm fra nettet når det er lite belastning på nattestid, og gi tilbake på dagtid når det er høy belastning.

Innhold

1	Innledning	1
1.1	Bakgrunn	1
1.2	Utslipp	2
1.3	Tekniske utfordringer	2
1.4	Autonome kontrollsystemer	3
1.5	Bærekraft	4
1.6	Konseptuelt design	5
2	Energibærer	6
2.1	Tekniske egenskaper	6
2.2	Kostnad	8
2.3	Livsløp, levetid og vedlikehold	8
2.4	Regelverk og Sikkerhet	9
2.5	Konklusjon energibærer	10
3	Driftsprofil	11
3.1	Rute	11
3.2	Rutetabell	12
3.2.1	Energibalanse	12
3.2.2	Effektuttak	14
3.3	Endringer	15
4	Designmetode	16
4.1	Moderne metodikk	16
4.2	Strategi	18
4.3	Bottom-up analyse	19
5	Skrogutforming	20
5.1	Hoveddimensjoner	20
5.2	Aktuelle skrogtyper	21
5.3	Valg av skrogtype	24
5.4	Konkludert skrogtype og hoveddimensjoner	26
5.4.1	Baugutforming	28
5.4.2	Akterskipsutforming	28
5.5	Endringer	28
6	Valg av konstruksjonsmateriale	29
6.1	Aluminium	29
6.2	Karbonfibersandwich	30
6.3	Styrkeanalyse	31
6.4	Konklusjon materialvalg	31

7	Propulsjon	32
7.1	Autonom drift	34
7.2	Manøvreringsevne	34
7.3	Valg av propulsjonssystem	35
7.4	Tap i system	36
7.5	Dimensjonering av system	37
8	Design	38
8.1	Designkriterier	38
8.1.1	Funksjonelt Design	38
8.1.2	Visuelt Design	39
8.2	Designspråk	39
8.3	Endelig Design	39
9	Generalarrangement	42
9.1	Planløsning og seksjoner	42
9.2	GA	43
10	Skrogmotstand	49
10.1	Empirisk skrogmotstand	49
10.1.1	Resultater	49
10.2	Praktisk Slepeforsøk	51
10.2.1	Metode	51
10.2.2	Resultater	53
10.2.3	Feilkilder	57
10.3	Konklusjon Skrogmotstand	57
11	Vektsberegninger	58
11.1	Metode	58
11.2	Resultat	58
11.2.1	Skrogvekt	59
11.2.2	Vekt av energilager	59
11.2.3	Signifikante vekter	60
11.2.4	Fast ballast	60
12	Stabilitet og sikkerhet	61
12.1	Metode	61
12.2	Resultat	62
12.2.1	Stabilitet ved små vinkler	62
12.2.2	Stabilitet ved store vinkler	63
12.2.3	Vanntette seksjoner	63
12.3	Sikkerhetsutstyr	64
13	Sjødyktighet	66
13.1	Metode	66

13.1.1	Akselerasjoner og tap	67
13.1.2	Dynamiske responser	67
13.2	Vurdering av resultater	67
14	Struktur	68
14.1	Metode	68
14.2	Topologi	69
14.3	Global langskipsstyrke	69
14.3.1	Langskips bøyemomenter	69
14.3.2	Kritiske Snitt	72
14.3.3	Nauticus Hull	72
14.3.4	Bulekontroll	74
14.4	Global Tverskipsstyrke	75
14.5	Lokal Styrke	76
14.5.1	Lastfordeling og opplagring	78
15	Kostnadsestimat	81
15.1	Metode	81
15.2	Fartøy	81
15.3	Energilager	82
15.4	Resultat	82
16	Diskusjon	84
16.1	Grønn Kai-konsept	84
16.2	Energilager	84
16.3	Drift	86
16.4	Fremgangsmåte	87
16.5	Skrogform	88
16.6	Materialvalg	89
16.7	Propulsjonsløsning	90
16.8	Visuelt design	91
16.9	GA	91
16.10	Slepemotstand	92
16.11	Vekt og stabilitet	94
16.12	Seakeeping	95
16.13	Struktur og styrke	95
16.14	Kostnadskalkyle	97
17	Endelig konsept	99
18	Konklusjon	100
19	Videre Arbeid	101
20	Referanseliste	102

A Data Energilager	I
B Driftsprofil	II
C Oversikt Bottom-up	V
D Skrogvurdering	VI
E Maskineri	VIII
F Teknsik Dokumentasjon	IX
G Prosedyre Modellforsøk	XII
H Skrogmotstand	XIII
I Vekt og Stabilitet	XXV
J Seakeeping	XXXIII
K Struktur	XXXV
L Kostnader	XLIII
M Renders Rhinoceros3D	XLIV

1 Innledning

Målet med dette arbeidet er å bidra til å løse problematikken med energimangel i Geiranger. Energimangel i Geiranger er en utfordring som kan få store konsekvenser for turistnæringen og lokalsamfunnet i møte med kommende krav [1]. Stortinget har vedtatt at all passasjertrafikk i verdensarvfjordene, blandt annet Geirangerfjorden, skal skje med utslippsfrie båter fra 2026. Dette betyr at turistnæringen må omstille seg til en ny og annerledes fremtid [2]. Geiranger er avhengig av turismen, og dermed er det avgjørende å løse disse utfordringene for å ivareta bygdas levebrød.

Oppgaven er en del av prosjektet “Grønn Kai” ved NTNU [3], et samarbeid med det lokale næringslivet. “Grønn Kai” omhandler kaianleggene i Stranda kommune og omstillingen som trengs for å imøtekomme utslippskravene [4]. “Grønn Kai” har bidratt med prosjektering av nullutslipps-sightseeingfartøy tidligere, men disse båtene krever store mengder energi. Strømnettet i området er ikke robust nok til å dekke dette behovet for energi med nullutslippsfartøy, spesielt i sommermånedene når turiststrømmen øker. Derfor er det nødvendig å utbedre tilgangen på strøm for å kunne drifte elektriske skip og annen nullutslippstransport i framtiden [5].

Fra arbeidet med “Grønn Kai” sommeren 2022 ble det konkludert med at en *Power Barge* kunne brukes til å frakte strøm [6]. En *Power Barge* er et flytende energilager. Det videre arbeidet omhandler dette fartøyet fra et skipsteknisk perspektiv. I denne seksjonen utdypes hovedproblemstillingene som inngår i arbeidet.

1.1 Bakgrunn

Bakgrunnen for prosjektet er å bidra til å løse utfordringene med energimangel i Geiranger. Tettstedet har begrenset kraftnettet, og er dårlig rustet for den kommende målsetningen om nullutslipp. Geiranger er et populært turistområde som står oppført på UNESCOs verdensarvliste [7]. Dette gjør det viktig å sørge for at sjøfarten i området er bærekraftig, og at den ikke påfører negative virkninger på nærmiljøet. Med nye passasjerbåter som drives elektrisk trengs ekstra energi for å utbedre lademulighetene i Geiranger [8].

Mangelen på strøm er kritisk, og det haster med å finne en løsning om elektrifisering skal skje innen tre år. Det er behov for økonomiske bidrag og gode løsninger. Det er ikke lett å løse strømutfordringene med enkle grep, da dagens strøm kommer fra Tafjord som ligger på andre siden av fjellet [9]. Å utbedre kraftlinjene fra Tafjord kan kanskje være en løsning, men det kan også komme i konflikt med kravene til verdensarvområdet. UNESCO har blant annet frarådet utbygging av en større kraftlinje så tidlig som i 2009, noe som har bidratt til å komplisere situasjonen [10].

Et siste alternativ vil være en sjøkabel. Det var rådet fra UNESCO-kommisjonen i 2009 [10]. Ulempen med sjøkabler er at lengden som trengs ofte er vesentlig lengre enn landbaserte alternativ. Dette blir ofte forsterket når det gjelder lange dype fjordarmer. Løsningen

vil også være tidkrevende, og svært kostbar. En analyse gjort av Sweco og Oslo Economics utgitt i januar 2022 konkluderte med at en økning i lengde på 25 % fra kraftlinje på land til sjøkabel, ville øke kostnadene med 50 % [11]. Tatt i betraktning kostnadene og tiltakene dette vil innebære er det urealistisk å anta at en sjøkabel vil være på plass innen 2026. Derfor må en løsning prosjekteres som kan bistå frem til et permanent tiltak gjennomføres.

1.2 Utslipp

Det er en økende bevissthet rundt miljøet og behovet for å redusere utslippene i maritim sektor. Sjøfartsdirektoratet har satt ambisiøse mål om at verdensarvfjordene skal være utslippsfrie innen 2026 [12]. Utover dette er også interessen økende blant rederier og turister [13]. Følgene innebærer at all passasjertrafikk i disse fjordene må foregå med båter som ikke slipper ut skadelige avgasser om turismen skal overleve.

Imidlertid er teknologien for å oppnå dette målet fortsatt et stykke fram i tid. Det er svært få aktuelle teknologier som kan imøtekomme utslippskrav til en fornuftig pris. For å kunne nå målene om utslippskuttet, må innovative løsninger på hvordan energi kan lagres og distribueres utvikles ytterligere [14]. Som følge av dette er det oppstått diskusjon rundt årstallet, og foreslått utsettelse av nullutslippskravet til 2030 [15].

I tillegg er det også et presserende behov for å løse energimangelen i Geiranger. En mulig løsning kan være et flyttbart energilager som kan kobles til strømmettet for å gi en midlertidig løsning på energimangelen. Dette vil gi tid til å utvikle mer langvarige og bærekraftige løsninger for å sikre en stabil strømforsyning til Geiranger, eksempelvis en sjøkabel [10]. Utslippsfrie løsninger som dette tar lenger tid å innføre, og midlertidig trengs en raskere løsning som for eksempel en *Power Barge*.

SO_x -, NO_x - og CO_2 -utslipp fra skipstrafikk i Geirangerfjorden kan ha negative konsekvenser for både nærmiljøet og verdensarven [16]. Disse utslippene kan føre til forurensning av luft og vann, som kan påvirke både mennesker, dyr og planter i området. Derfor er det viktig å redusere utslippene. Ulempen er dersom overgangen blir for tidkrevende, kan det risikeres at turismen forflyttes til veinettet [17]. På veinettet er det foreløpig ingen krav til nullutslipp-transport og dette medfører ingen reduksjon i utslipp, kun en forflytning av utslippskildene. Derfor trengs en løsning snarest.

1.3 Tekniske utfordringer

Prosjektet vil være utfordrende, da det krever ny teknologi og god planlegging. Et godt resultat vil kunne bidra til å gjøre Geiranger til et mer bærekraftig og attraktivt turistområde. Det vil også kunne være en modell for andre områder som står ovenfor liknende utfordringer. Derfor vil også en del av utfordringene inneholde visuelle aspekter siden innføring av ny infrastruktur i Geiranger kan virke ødeleggende. All ny teknologi må integreres på en bærekraftig måte. Dette vil gjelde alle elementene i “Grønn Kai” [6].

En av de største tekniske utfordringene med å lage et flyttbart energilager, er å finne en måte å lagre og transportere energi på en sikker og effektiv måte. Dette krever innovasjon og teknologi. Skip som frakter energi eksisterer allerede, men dette er fartøy med generatorsett og driftes på diesel eller LNG [18] [19]. Designprosessen blir derfor ekstraordinær da få kjente fartøy gjør tilsvarende operasjon. Det er viktig å lage et skip som er stabilt, sikkert og effektivt. Det må også være lett å manøvrere, spesielt om autonomi er målet på sikt. Hvis prosjektet lykkes, vil det kunne være en viktig løsning for å håndtere energimangel og utslippsproblematikk. En realisering vil også bevise konseptet slik at andre anvendelser kan bli mer aktuelle.

Som energibærer er det foreslått å bruke svinghjul. Bruken av svinghjul som energilager i skip er også lite utbredt. Svinghjul karakteriseres som enkle å drifte, har lav responstid, lang levetid og høy energitetthet [20]. Dette gjør svinghjul svært attraktivt som energilager til maritimt bruk. Hittil er det undersøkt om en svinghjulsmodul kan bistå i drift, eller om små helelektriske operasjoner kan gjennomføres [21]. Risikoen for rotorhavari vil derimot introdusere nye problemstillinger sammenliknet med batteri [22]. Dette sammen med andre dynamiske responser kan gjøre bruken av disse energilagrene utfordrende, spesielt om mange enheter skal installeres i et enkelt fartøy. Ytterligere forskning vil derfor bli viktig i fremtiden om kommersialisering av svinghjul på skip er målet. Dette arbeidet vil ta for seg enkelte av disse problemstillingene.

Patenter er viktige for å stimulere innovasjon og utvikling av nye teknologier, da det gir oppfinneren eller selskapet et økonomisk insentiv til å videreutvikle ideene sine [23]. Patenter kan også gi grunnlag for samarbeid og lisensavtaler mellom ulike aktører innenfor samme fagfelt. Aktuelle patenter som inngår i dette arbeidet er undersøkt. I denne sammenhengen er det gjort funn av patenter som enten transporterer energi i andre energibærere på skip, eller store lasteskip med enorm kapasitet som frakter energi i kjemisk form [24]. Direkte likheter med dette arbeidet er det ikke gjort funn av.

1.4 Autonome kontrollsystemer

Kravspesifikasjonen innehar også et ønske om at fartøyet skal kunne opereres autonomt på sikt. Det er mulig å gjøre denne typen flyttbare energilager autonome. Autonome skip kan navigere og manøvrere selvstendig. Dette reduserer driftskostnadene og vil kunne utfordre bemanning på sikkerhet i framtiden [25]. Kunstig intelligens (AI) kan også optimalisere driften av skipet. Dette gjelder ikke bare skipsfarten, men også allokeringen av energien om bord. AI kan analysere data og automatisk tilpasse driften av skipet for å sikre at det fungerer optimalt. Dette kan bidra til et redusert energiforbruk som vil gagne alle aktørene.

Autonome skip kan operere uten mannskap ombord eller styres fra land. Det er flere teknologier som må til for å gjøre skipene autonome som sensorer, datamaskiner og kommunikasjonsteknologi. For å innføre autonome skip, må det først eksistere en teknologisk plattform som kan håndtere all nødvendig informasjon. Deretter må det gjøres en rekke

tester og evalueringer for å sikre at sikkerhet og pålitelighet ivaretas.

I tillegg til tekniske utfordringer, er det også regulatoriske og juridiske utfordringer knyttet til innføringen av autonome skip. Det er nødvendig å utvikle et juridisk rammeverk som tar hensyn til de spesielle utfordringene som autonome skip representerer, slik som ansvarsspørsmål og sikkerhetskrav. Autonome skip skal gi flere fordeler, som for eksempel økt sikkerhet, redusert miljøpåvirkning og økt effektivitet. Autonom drift kan også bidra til å redusere kostnadene ved sjøtransport, da kostbart mannskap ombord kan unnlates og det kan optimalisere ruten og fartøysystemene. Likevel er det fortsatt mange utfordringer som må overvinnnes før autonome skip kan bli en realitet. Det krever tett samarbeid mellom teknologiske utviklere, regulatoriske myndigheter og industrien for å utvikle en trygg og bærekraftig autonom sjøfart.

Storfjorden er utpekt som teststrekning for utvikling av autonome skip. Fjorden er ideell for testing av ny teknologi på grunn av sin størrelse, trafikk, og variasjon i værforhold. Utviklingen av autonome skip har vært et fokusområde i den maritime industrien de siste årene, og det er forventet at denne teknologien vil forbedre sjøfarten i fremtiden [26] [27].

I dag er det flere foregående prosjekter for å igangsette industrien tilhørende autonom skipsfart. SINTEF er en av aktørene som har offensive visjoner om autonom drift [28]. MASSTERLY, et samarbeid mellom Kongsberg og Wilhelmsen, er også kommet langt på vei med sine teknologiske utviklinger [29].

1.5 Bærekraft

Det flyttbare energilageret som skal løse utfordringene relatert til energimangel og utslipp i Geiranger, inngår i flere bærekraftsmål, som illustrert i Figur 1.1. Noen av de relevante målene som inngår i arbeidet, er:



Figur 1.1: Bærekraftsmål 7, 9 og 13 [30] [31] [32].

- Bærekraftsmål 7 – Rimelig og fornybar energi: Arbeidet inngår i dette målet ved å sørge for at Geiranger har tilgang på rimelig og fornybar energi. Det flyttbare energilagringsskipet skal forflytte energi fra fornybare kilder, som lokal vannkraft, og transportere energien til området når det er behov for det. På denne måten tilrettelegges distribusjon av fornybar energi [30].

- Bærekraftsmål 9 – Industri, innovasjon og infrastruktur: Arbeidet med energilageret vil inngå i dette målet da resultatet kan tilrettelegge for industrielle nyvinninger. Utover dette er oppgaven en del av et lokalsamfunns grunnleggende infrastruktur. Som nevnt tidligere er også innovasjon et nøkkelpunkt her, og arbeidet kan på sikt gi positive bærekraftige ringvirkninger [31].
- Bærekraftsmål 13 – Klimaendringer: Arbeidet inngår i dette målet ved å redusere utslippene i Geiranger. Dette hører sammen med intensjonen bak de kommende kravene og “Grønn Kai” [32].

1.6 Konseptuelt design

Konseptuelt design er den første fasen i designprosessen av en ny skipstype. Denne fasen går ut på å utvikle konsepter, ideer og prinsipper for å løse et bestemt problem. Det er her det defineres hvordan funksjoner og krav som skal oppfylles, og hvilke løsninger som kan være mulige for å oppnå dette. Konseptuelt design er en kreativ fase hvor grunnlaget legges for det endelige produktet. Derfor må det tas forbehold om at et endelig produkt vil ha avvik fra arbeidet som gjøres videre.

I dette prosjektet er konseptuell design avgjørende, da det skal utvikles en ny type skip som skal være utslippsfritt og tilrettelagt for autonomt bruk. Dette krever nytenkning og innovative løsninger som kan gi mulighet for å realisere et slikt skip. Det konseptuelle designet vil derfor være med på å stake ut kursen for fremtiden. Det vil være en iterativ prosess hvor ulike løsninger testes og vurderes før det landes på et endelig design.

2 Energibærere

I sluttrapporten Grønn Kai 2022, er det gitt en veiledning på bruk av Spinning Energys teknologi [3]. Konklusjonen er basert på en helhetsvurdering av energibærernes egenskaper. Det blir hovedsaklig vektlagt regelverk og energitetthet. Regelverket som tilkommer bruken av batteri, er ønsket å unngå. Batterier vil medføre komplikasjoner for fartøyet da ekstra krav tilfaller skipet. I denne sammenhengen vil en gjennomgang av egenskapene gjennomføres for å sikre en god avgjørelse.

2.1 Tekniske egenskaper

Energitettheten er et mål på hvor mye energi som kan lagres per størrelsesenhet. Ofte er dette per volum eller per masse. En teknisk sammenlikning av aktuelle leverandørers data vil være en god veiledning på energitetthet. Målet er en kompakt platform med mest mulig energi per volum. I en teknisk sammenlikning utpekes batterier fra Corvus med tilgjengelig data, og Spinning Energys data basert på muntlig kilde. All benyttet teknisk data er i Vedlegg A.

Fra Corvus er det valgt å undersøke deres mest energitette batteripakke, *Blue Whale* [33]. En eksempelkonfigurasjon med fire pakker sammensatt av seks strenger gir en god pakke å beregne med, da kapasiteten ligger i forventet utfallsrom til fartøyet. Fra Spinning Energy er det satt sammen 58 moduler for å tilsvare batteripakken fra Corvus i energimengde. Dette gir to omtrentlige like store energilager til videre vurdering. Eksempelpakkene er presentert i Tabell 2.1.

Tabell 2.1: Energilagrene som sammenliknes, en energilagringsspakke på omtrent 14,5 MWh.

Corvus Blue Whale 4 pcs - 6 strings			Spinning Energy 58 units		
Lengde	10,2	m	Lengde	14,5	m
Bredde	5,56	m	Bredde	4,0	m
Høyde	2,85	m	Høyde	1,8	m
Kapasitet	14 448	kWh	Kapasitet	14 500	kWh
Spenning	1075	V	Spenning	1000	V
C-rate	0,7	h^{-1}	C-rate	10	h^{-1}
Vekt	122 200	kg	Vekt	69 600	kg

Med egenskaper fra Tabell 2.1 lagt til grunn, kan energitetthet per volum og vekt beregnes. Det presiseres at enkelte deler av tallgrunnlaget kan inneholde ulike deler av støttesystemer og at ingen øvrige systemer er lagt til. Beregnede energitettheter er presentert i Tabell 2.2.

Tabell 2.2: Volumetrisk og gravimetrisk energitetthet med utgangspunkt i egenskapene oppgitt i Tabell 2.1.

Corvus Blue Whale 4 pcs - 6 strings			Spinning Energy 58 units		
Volumetrisk tetthet	89,4	kWh/m ³	Volumetrisk tetthet	138,9	kWh/m ³
Gravimetrisk tetthet	118	kWh/tonn	Gravimetrisk tetthet	208	kWh/tonn

Beregningene bekrefter konklusjonen fra Grønn Kai-prosjektet om at Spinning Energy er en mer energitett teknologi. Energitettheten til svinghjulene tillater 55% mer energi lagret per volum, og energilagerets vekt kan tilnærmet halveres med denne teknologien.

C-raten vil også ha innvirkning på tidsbruk ved inn- og utlading. C-raten er et mål på hva et energilager tåler av maksimal utlading. Raten er påvirket av faktorer som intern motstand, kjøling og kjemiske prosesser. Siden de mest energitette batteripakkene til Corvus har minst volum avsatt til kjøling, er C-raten lav på 0,7 [33]. Fra Spinning Energys side er det ikke satt noen begrensning til svinghjulet isolert, men som følge av eksterne faktorer har de begrenset energiovergangene med en C-rate på 10. Den matematiske sammenhengen mellom batteriers kapasitet og maksimal utladningseffekt er vist i Formel 2.1 [34].

$$P_{max} = C \cdot E \quad (2.1)$$

Hvor P_{max} er høyest mulige utladningseffekt fra energilageret målt i kilowatt, C er utladningsraten (C-rate), og E er energilagerets kapasitet i kilowatttime.

Tabell 2.3: Energilagrenes egenskaper for utlading.

Corvus Blue Whale 4 pcs - 6 strings			Spinning Energy 58 units		
P_{max}	10 114	kW	P_{max}	145 000	kW
Utladingstid	86	min	Utladingstid	6	min

Tabell 2.3 viser at svinghjulene tillater raskere energioverganger med muligheten til å utlades fullstendig på 6 minutter. For batteriene er dette langsomt og vil ta 86 minutter. Likevel er effekten batteripakken kan utlades med, godt over forventede energioverganger. Hverken utlading til nullutslippsfartøy eller oppladning på nattetid er ment til å være av denne størrelsesorden. Derfor er denne egenskapen av mindre betydning når batteripakkene er av denne størrelsen.

På generelt grunnlag vil energitettheten til svinghjul være høyere enn i litium-ionbatterier. Hvor kjemiske prosesser og varme begrenser et batteri, er materialet rotoren er bygd opp av mest kritisk for et svinghjul. Moderne komposittmaterialer som karbonfiber tillater høye turtall i rotoren, og mengden lagret energi kan økes ytterligere. Lagret rotasjonsenergi er basert på en kvadratisk sammenheng og en økning i turtall gir store utslag på lagret energi [35].

På en annen side har batterier mindre behov for omforminger i prosessen, da energien allerede lagres elektrisk og kan videreføres til et annet fartøy uten mange omforminger. Dette reduserer antall tapsledd i det helhetlige systemet sammenlignet med svinghjul hvor rotasjonsenergien må konverteres til elektrisk energi, og eventuelt videre til korrekt spenning og strøm.

2.2 Kostnad

Kostnaden på energilagerene er også essensielle. Teknologiens modenhet og råvarepriser vil i begge tilfeller ha innvirkning på prisen. For lithium-ionbatterier er tallgrunnlaget basert på en analyse av Bloomberg publisert desember 2022. I 2022 lå snittprisen for batteripakker av lithium-ionbatterier på \$ 151 per kilowattime [36]. Spinning Energy oppga i 2022 til Grønn Kai-prosjektet at prisen per enhet var 1,2 millioner NOK. Med eneheter på 250 kilowattime kapasitet tilsvarer dette \$ 433 per kilowattime.

Tabell 2.4: Pris per kilowattime for hver teknologi og resulterende pris for hele batteripakken. Vekslingsrate USD/NOK = 10,70.

Corvus Blue Whale 4 pcs - 6 strings			Spinning Energy 58 units		
Pris-per-mengde	151	\$/kWh	Pris-per-mengde	433	\$/kWh
Pris for pakke	2 181 648	\$	Pris for pakke	6 504 673	\$
Pris for pakke	23 343 634	NOK	Pris for pakke	69 600 000	NOK

Tabell 2.4 viser beregningene knyttet til energilagrenes pris totalt og spesifikk pris per kilowattime. Med dette perspektivet er batterier mer attraktivt. Basert på Bloomborgs analyse er det forventet en ytterligere prisreduksjon, og innen 2026 antas en pris per kilowattime for lithium-ion-batter på \$ 100 [36]. Prognoser for Flywheel Energy Storage Systems' (FESS) prisutvikling er ukjent.

2.3 Livsløp, levetid og vedlikehold

En annen viktig del i arbeidet mot mer bærekraftige løsninger er produktets livssyklus. Dette innebærer ringvirkningene produktet genererer i produksjon, distribusjon, operasjon og avhending. For å oppnå en høy grad av bærekraft vil derfor en løsning som krever mindre vedlikehold, ha lengre levetid og gi minst miljøpåvirkninger, være ønsket løsning. Den tekniske sammenlikningen og undersøkelser av livsløpsanalyser vil bidra til en god

beslutning av energibæreren.

Det gjøres derfor en undersøkelse av både svinghjul og lithium-ionbatterier. Livsløpsanalyser er en metode som vurderer produkters miljøpåvirkning i ulike faser av produktets levetid. I følge en rapport fra 2021, med tittel *Energy and environmental footprints of flywheels for utility-scale energy storage applications*, blir svinghjul av ulike rotormaterialer sammenliknet. Studiet sammenlikner også enerilagringsystemers karbonavtrykk fra øyeblikket det er produsert til det selges på markedet, såkalt *cradle-to-gate*. I denne sammenlikningen er også lithium-ionbatterier inkludert [37].

Studiet viser til en dobling av klimaavtrykk målt i $kgCO_2eq/MWh$ for lithium-ion batterier mot svinghjul lagd i kompositt. Svinghjul i kompositt har et klimagassutslipp på 25-30 $kgCO_2eq/MWh$ sammenliknet med litium-ionbatterier som slipepr ut 50-60 $kgCO_2eq/MWh$. Om det ligger til grunn at resten av produktets livsløp skal foregå med ren energi fra lokal vannkraft, betyr det at produksjon og distribusjon er de viktigste fasene i livsløpet med tanke på klimagassutslipp [37].

Levetiden er også viktig, og studiet viser til lithium-ion batteriers forventede levetid på 8,5 til 11,5 år. Til sammenlikning presenteres forventet levetid for svinghjul til 20 år [37]. Dette gjør svinghjul mer attraktive og har innvirkning på prisperspektivet. Hvis levetiden til svinghjul er det dobbelte av lithium-batterier, kan det være mer akseptabelt med den høye kostnaden teknologien innebærer.

Et annet studie fra 2005, med tittel *Flywheel energy storage system for electric start and an all-electric ship*, viste også til 20 års levetid for svinghjul lagd i kompositt. Studiet tok for seg horisonten for svinghjul som energibærer i helelektriske applikasjoner. Det fremhevet også svinghjuls gode modularitet og lavt vedlikeholdsbehov [21].

2.4 Regelverk og Sikkerhet

Siden energibæreren skal monteres på skip, er det essensielt å undersøke hvilke regelverk som gjelder for gitte teknologier. Generelt sett må regelverkene for alle elektriske installasjoner følges. Dette innebærer godkjente komponenter, teknisk dokumentasjon og tilstrekkelig dimensjonerte systemer. Dette vil gjelde uavhengig av energibærer [38].

DNV's regelverk stiller krav til bruk og installering av batterier. Batterier skal monteres etter godkjente prosedyrer, være fastspent korrekt og behandles som risikabel last. Årsaken er blant annet risikoen for alvorlig havari om batteriet opplever en ukontrollert utladning. Batterier er store og tunge installasjoner som kan skape farlige situasjoner. Regelverket inneholder også reguleringer for å ivareta god brannsikkerhet. Isolasjon og slukkesystemer er nødvendige. Systemene vil medføre et behov for ekstra plass, samt kostnader for å oppfylle kravene [39].

Svinghjulsleger er regulert i en langt mindre grad per i dag. Montering av disse skal gjøres i tilsvarende orden som batteri. Likevel har DNV anbefalinger til praksisen. I dokumentet

DNV-RP-0043 “Safety, operation and performance of grid-connected energy storage systems” er det gitt anbefalinger for praksis med ulike energilager [40]. Her beskrives flere energibæreres anbefalte bruk. Utover dette er det lite føringer for bruk og montering av disse energilagrene. Det er likevel uklart hvilke regelverk som vil utvikles på sikt. Det kan heller ikke utelukkes at ekstra krav vil tilfalle energilageret i et forsøk på å klasse skipet på tross av manglende regelverk.

Av sikkerhetshensyn er det også forskjellige farer som må betraktes. Lithium-ion batterier kan overopphetes ved ukontrollerte utladninger, noe som kan resultere i termisk rømling [22]. Da kan det dannes brennbare gasser og i verste fall oppstå brann. Slukking av elektriske installasjoner er heller ikke enkelt og krever ofte ferskvann eller skum. Utvikling av CO-gass vil også kunne utgjøre en fare for personell og passasjerer [41].

Siden det ikke er kjente anvendelser av svinghjul på skip, er det ingen tilfeller å hente erfaringer fra. Rotorhavari kan skape eksplosjonsfare. Et tiltak mot dette vil være å rotere svinghjulet i en hastighet langt lavere enn rotormaterialets kritiske turtall. Vibrasjoner og interferens med andre komponenters egenfrekvens ombord kan også forekomme. For å unngå dette er det viktig å undersøke hvilke frekvenser dette omhandler og videre unngå samsvarende turtall [22].

Det kan også vurderes et scenario hvor modulene løser fra sine innfestninger. Dette kan forekomme i sjø med stor bevegelse eller ved akselerasjoner i rotoren som innfører større vriment enn hva fundamentet tåler. Et tiltak mot dette vil være solid innfestning og grundige strukturanalyser av svinghjulenens opplagring.

2.5 Konklusjon energibærer

Basert på utredningen velges det å videre undersøke svinghjul som energilager. Teknologien er ny og fremtidsrettet. Energibæreren er energitett, og svært fleksibel i utladningshastigheter og konfigurasjoner. Ved å unngå kjemisk energilagring vil også sikkerhetsutfordringer forbundet med litium-ionbatterier utelukkes fra prosjekteringen. Sammenliknet med litium-ionbatterier er det et mindre omfattende regelverk å følge, noe som gjør at oppgaven i større grad kan omhandle løsninger og i mindre grad DNVs reguleringer.

Livsløpsanalyser tilsier også at svinghjul vil være en god løsning i søken etter et moderne og bærekraftige energilager. Teknologien tillater derfor Grønn Kai-prosjektet å opprettholde sin bærekraftige og tekniske profil i utredningen av dette fartøyet, og den tilhørende infrastrukturen.

En ulempe med valget vil være kostnaden teknologien innebærer i dag. Likevel må det presiseres at svinghjulene krever få støttesystemer og sikkerhetsutstyr som vil kreve mindre ekstrakostnader. Den lange levetiden gjør også at energilageret vil være nyttig over lengre tid og dette vil rettferdiggjøre noe av den høye kostnaden. Et endelig kost-estimat kan vise ytterligere hva et fartøy som dette vil koste.

3 Driftsprofil

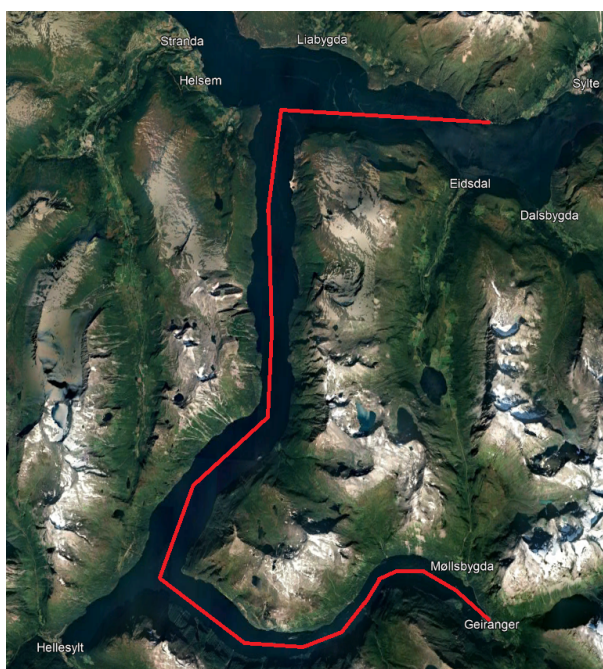
Energien som fraktes skal holde til både framdrift og last. Dette innebærer at energimengden må være presis og korrekt beregnet. Med valgt energibærer kan det lages en driftsprofil. Driftsprofilen er et nyttig verktøy som forsikrer arbeidet. Dette gjør at videre beregninger har et godt tallgrunnlag. Det er to mål som er avgjørende for videre arbeid. Mengden lagret energi, og målet på effektuttak. Disse to parameteren gir hver sin indikasjon på driften. Området fartøyet skal gå i er rolige når det gjelder både trafikk og værforhold, og faller under lavere krav for sjødyktighet. Det er fortsatt særegne utfordringer med fjorden som kan gjøre navigasjon på nattestid risikabelt. Driftprofilen skal lages med følgende krav:

- Lade nullutslippsfartøyenes brukskapasitet fire ganger, $4 \times 2620 \text{ kWh}$ [42].
- Forsyne seg selv med strøm for tur-retur Linge - Geiranger.
- Opprettholde 10 % sikkerhetsmargin.

3.1 Rute

Fartøyet rute starter på Linge fergekai ved Linge, rett vest for Valdalen i Storfjorden. Derfra vil ruten gå inn i Storfjorden mot Hellesylt. Når fjorden splitter seg i Figur 3.1 vil fartøyet runde Lundaneset og Matvika for å gå østover inn i Geirangerfjorden til Geiranger. Figur 3.1 viser rutens strekning med en estimering av navigasjonskurser.

Ruten er 25 nautiske mil lang og går gjennom et område med særegen kysttrafikk. Det er lite trafikk i området annet enn fritidsbåter, ferger, arbeidsbåter til havbruk og cruiseskip. Særegne utfordringer med dette området er at det er langt mellom bebyggelser som gir fra seg lys, så fjordene er mørklagt på nattestid. I tillegg er det få belyste navigasjonsmerker, og de høye fjellene og smale fjorden kan gjøre det utfordrende å benytte GPS. Derfor vil et tryggere navigasjonsverktøy i området være radar.



Figur 3.1: Satelittbilde av området med inkludert rute fra Linge til Geiranger [43].

Fartøyet antas for å gå i en marsjhastighet på 10 knop, men vil treffe en sone med fartbegrensning innerst i Geirangerfjorden. Siste 1,3 nautiske mil inn til Geiranger er det en hastighetsbegrensning på 8 knop, og siste 0,3 nautiske mil på 3 knop.

3.2 Rutetabell

Grensebetingelsene må fastsettes for å kartlegge bruken av fartøyet. Med dette menes rutens lengde, karakteristikk og tidsbruken i løpet av døgnet. Fartøyet skal gå i en syklus som gjentas daglig. I løpet av døgnet må fartøyet anskaffe all nødvendig energi, gjennomføre ruten sin, levere energi til logistikken og alltid ha en nødvendig margin tilgjengelig. En rutetabell lages derfor for å bekrefte at alle oppdragene lar seg gjennomføre på et døgn som vist i Tabell 3.1. Tilgjengelig tid vil også ha innvirkning på hastigheten fartøyet må gå i.

For å generere disse rammebetingelsene i tidlig fase blir det gjort antakelser. Siden passasjerbåtene til “Grønn” Kai ikke er bygget ennå, er ladetidspunktene til disse antatte verdier. Tilgjengelig ladeeffekt er også en antatt verdi basert på tilgjengelig teknologi fra Stemmann med merkevaren FerryCharger [44]. Utover dette er hastigheten uavklart i tidlig fase av prosjektet, men initielle analyser tilsier et effektbehov på 500 kilowatt ut fra energilageret til propulsjon for en hastighet på 10 knop.

Tabell 3.1: Oversikt over fartøyets lokasjon til døgnet tider med beskrivelse. G = Geiranger havn, L = Linge ferjekai.

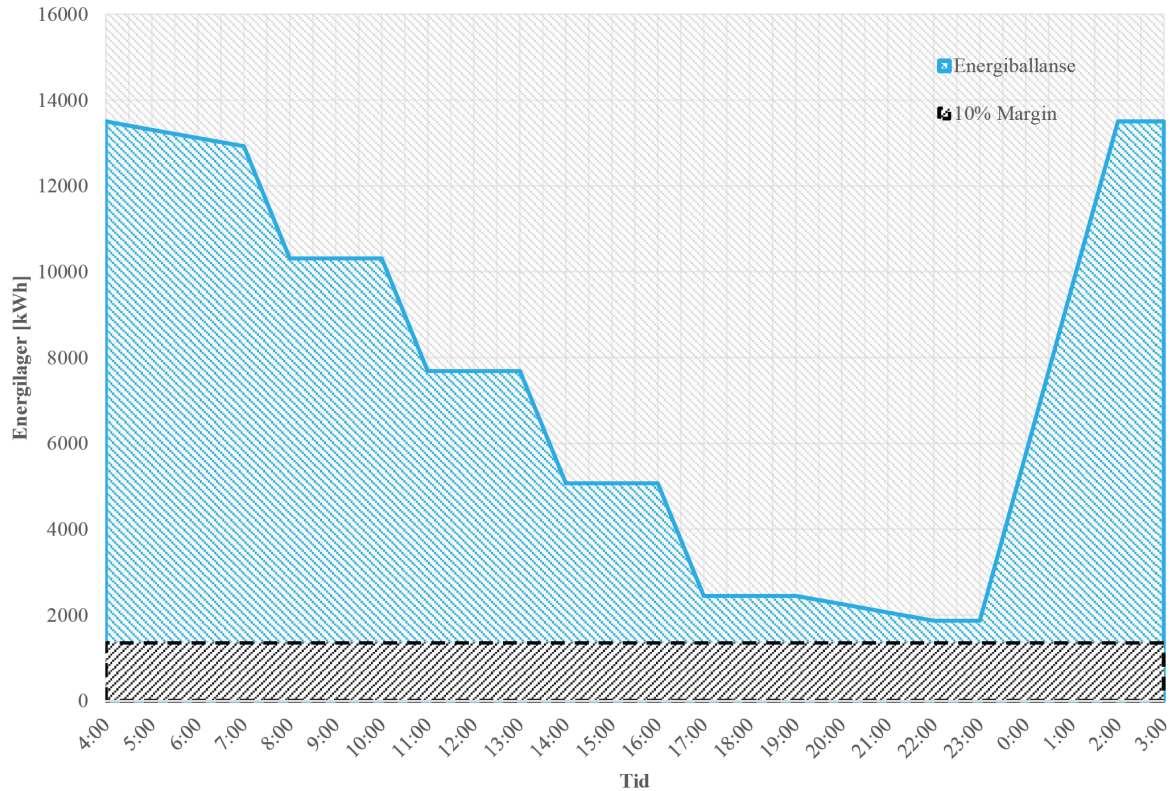
Tid	Lokasjon	Beskrivelse
04:00	L	Ferdig oppladet 13,5MWh
04:30	L	Avgang Linge
08:00	G	Ankomst Geiranger
08:00	G	Første opplading av passasjerbåt
11:00	G	Andre opplading av passasjerbåt
14:00	G	Tredje opplading av passasjerbåt
17:00	G	Fjerde opplading av passasjerbåt
20:00	G	Avgang Geiranger
23:30	L	Ankomst Linge
00:00	L	Start opplading på 4MW

3.2.1 Energibalanse

Kapasiteten til energilageret er en svært viktig parameter å vurdere. Målet på kapasitet gir informasjon om hvor mye energi som kan lagres i systemet. Dette er avgjørende for å sikre at energilagret er tilstrekkelig dimensjonert til å utføre hele driftsprofilen.

Energibalansen er mest viktig for å kontrollere kapasiteten. Det lages en oversiktlig profil som kontrollerer at fartøyet har nok energi til alle oppgavene det skal utføre. Profilen er satt i et tidsrom over 24 timer og er grafisk presentert i Figur 3.2.

Driftsprofil - Energibalanse



Figur 3.2: Oversikt over fartøyets kapasitet og energibalanse i løpet av et døgn.

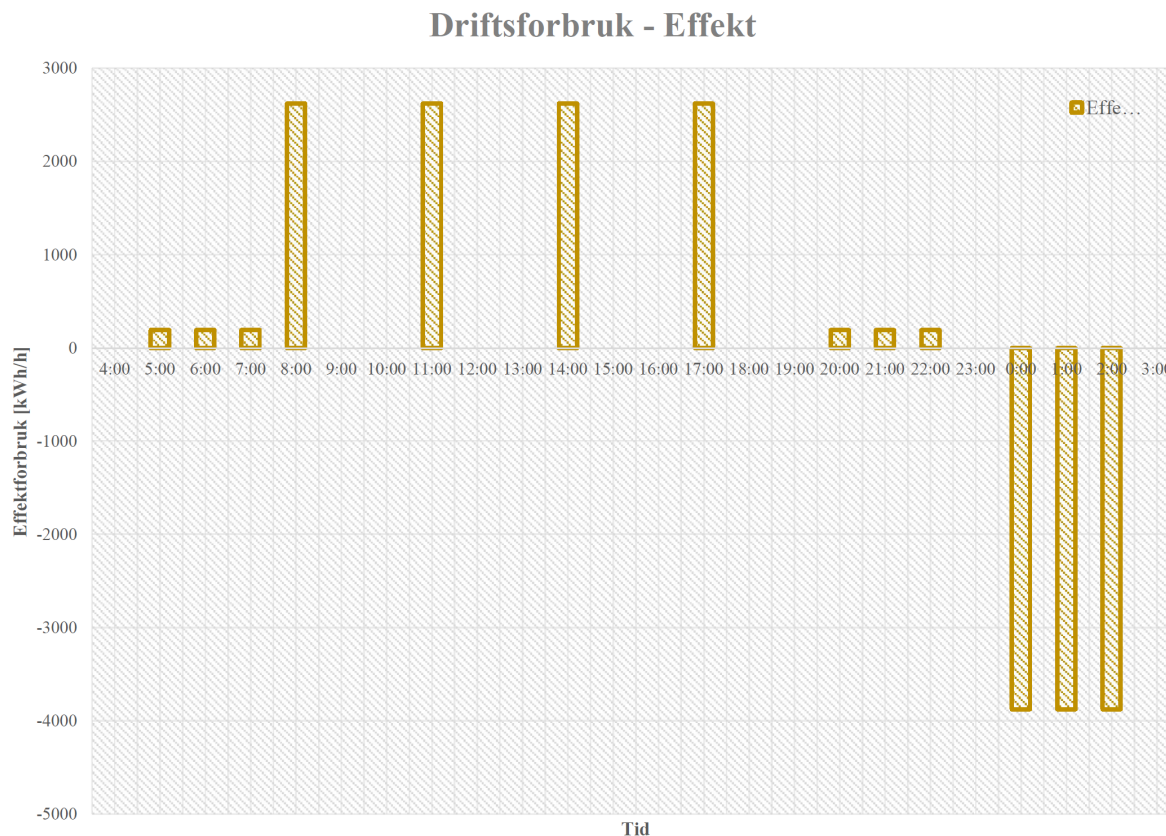
Tid er avgjørende i rutetrafikk, og dette gjelder også for et fartøy som skal frakte energi til nødvendig infrastruktur. For at timeplanen til fartøyet skal gå opp med rutetrafikken, må det fungere som en tilgjengelig energikilde i Geiranger igjennom hele dagen. Ettersom disse timene blir stillestående, må de øvrige timene i døgnet brukes effektivt til transit og opplading. Derfor vil det være et begrenset spillerom for disse hastighetene. Både transporthastighet og ladehastigheter må være effektive.

Diagrammet til energibalansen indikerer gjenværende kapasitet i energilageret til ulike tidspunkt. På natten vil fartøyet lades opp med en effekt på 4 - 6 megawatt, avhengig av lader. Dette antas å ta 2 - 4 timer. Etter denne oppladingen vil fartøyet starte ruten inn til Geiranger for å være tilgjengelig der samtidig med første passasjerbåt til lading. Etter dette er det satt inn tre ytterligere utladninger til passasjerbåtene i løpet av dagen. Når arbeidet er utført vil fartøyet returnere til sin hjemhavn. Over natten startes syklusen på nytt.

Den svarte linjen i bunnen av diagrammet indikerer den ekstra marginen på 10 % som er oppgitt i skipets kravspesifikasjon. For å finne en balanse mellom kost og nytte er det viktig at kapasiteten tappes så langt ned mot dette som mulig uten å gå under. Årsaken er at fartøyet ikke bør ha mer energilager enn nødvendig om bord. Dette gir ekstra kostnader, vekt og volumer som ikke er ønskelig.

3.2.2 Effektuttak

Kapasiteten er ikke den eneste viktige parameteren når det gjelder energilagringssystemer. Effekten som lagringssystemet kan levere, er også essensiell for å sikre at det kan møte de kravene som stilles til energitilførselen. Effekten refererer til energimengden per tidsenhet som systemet kan levere, og dette er en viktig faktor å vurdere. Effektflyten som resultat av driftsprofilens energibalanse og timeplan er visualisert i Figur 3.3.



Figur 3.3: Effekten inn og ut av systemet hver time ved normal bruk basert på driftsprofilen. Positive verdier er ut av lageret, negative er inn i lageret.

Relasjonen mellom energi og effekt er forbundet med tid. Som poengtert tidligere er tids-skjema avgjørende og derfor må energibalansen undersøkes nærmere. Selv om mengdene energi er tilgjengelig på strømnnett og i energilageret, er det ingen garanti for at omliggende infrastruktur kan tillate overføringene. Effekten er bindeleddet og vil være med på å bekrefte hvor realistiske disse tallene er. Utstyr, mottakere og ladesystemer har begrensninger på hvor stor effekt de tillater og dette vil påvirke hvor lang tid overføringene tar. Derfor er det ikke ønsket ladeeffekt over 5 megawatt og hver utladning til passasjerskip har 3 timer til rådighet.

Tallgrunnlaget og rute for presentert grafikk finnes i Vedlegg B.

3.3 Endringer

Utover i arbeidet ble en endring på antall svinghjul redusert til 54 moduler som følge av mer pålitelige tall. Dette tilsvarer et energilager på 13,5 megawattimer. Nye skrogformer endret effektbehovet i betydelig grad, som tillot denne endringen. Dette reduserte lageret med 500 kilowattimer fra “Grønn Kais” opprinnelige anslag. Nye tall og verdier er brukt i den presenterte driftsprofilen.

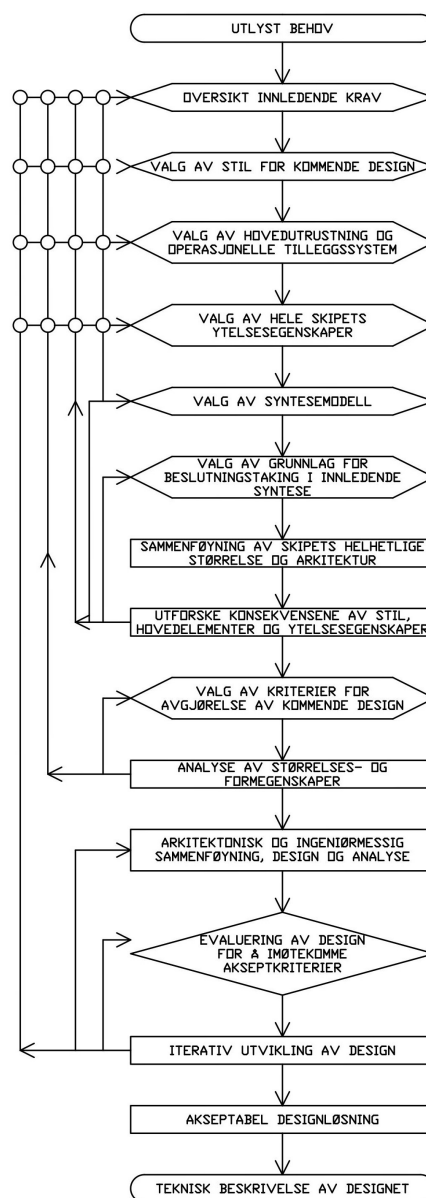
4 Designmetode

Designmetoden i en arbeidsprosess som denne, vil være svært kompleks da alle valg må baseres på midlertidig data. Dette er en skipstype det ikke finnes noen gode alternativer å sammenlikne med. I en slik arbeidsprosess må alle egenskaper og funksjoner fastsettes tidlig slik at et overordnet inntrykk av alle komponentene kan dannes. Uten dette overblikket, er det lett å overse essensielle elementer som kan medføre større kompromisser på sikt. Derfor må det samles godt med relevante data, og alle spesifikasjoner må være avklart så tidlig som mulig.

4.1 Moderne metodikk

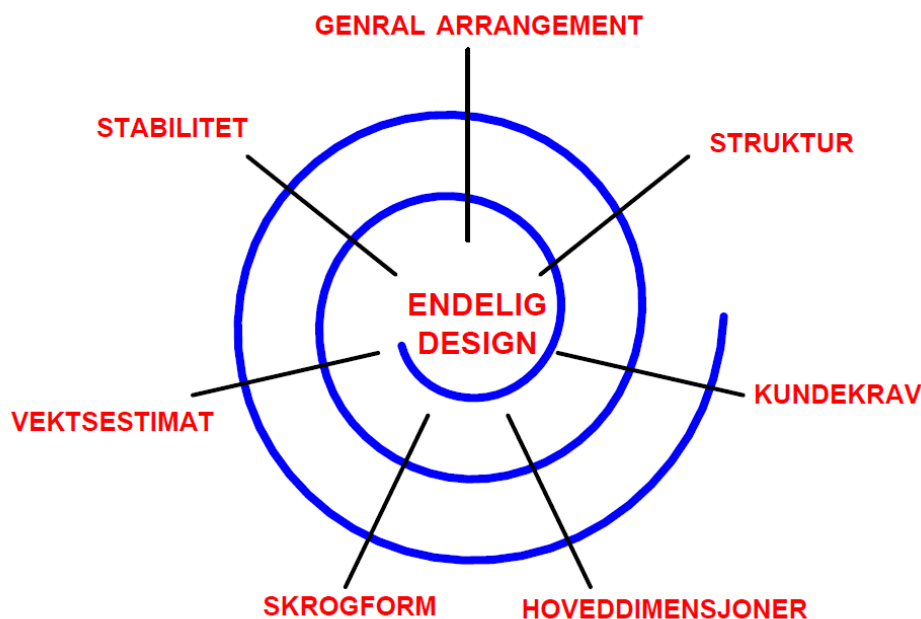
Videre i prosessen blir arbeidet mer iterativt, og det vil kreves at avgjørelsene gjentas flere ganger etter hvert som datagrunnlaget utvikler seg. En designspiral er ofte omtalt som en godt beskrivende metode for skipsdesignprosessen. En mer moderne måte å arbeide på er vist i Figur 4.1. Grafikken er hentet fra ”*Choosing the style of a new design - The key ship design decision*” av David Andrews publisert i 2012 [45] og viser hvilke valg som må tas fram mot det endelige produktet.

I David Andrews artikkel er marinefartøy lagt til grunn, men mange av prinsippene har overføringsverdi til designprosessen generelt. Årsaken til at denne metoden er relevant for denne designprosessen, er at problemstillingen omhandler stilmessige valg når et nytt design skal skapes. Utfordringen med marinefartøy er ofte at nye skip skal inneha ny teknologi og utrustning som gjør hver generasjon er svært forskjellig fra foregående. Dette samsvarer med denne arbeidsprosessen hvor det skal prosjekteres en skipstype med lite tilsvarende arbeid å referere til. Andrews utdyper også at når stil skal inkluderes i designprosessen, vil det skape ringvirkninger. Dette gjør at de andre fagdisiplinene som inngår i prosessen også må ta høyde for utseendet.



Figur 4.1: Moderne designmetodikk med essensielle nøkkelaugjørelser oversatt til norsk [45].

David Andrews refererer til fem hovedkategorier. Speed, Seakeeping, Strength, Stability og Style. Under dette arbeidet vil speed i hovedsak omhandle slepemetstand og maskineriets energibehov. Seakeeping er av relevans da svinghjul er uvanlig å montere i skip og kan utsettes for ukjente påkjenninger ved maritim bruk. Stability, skipets stabilitet, er noe beslektet med dette og det vil være like avgjørende for den særegne lasten i tillegg til gjeldende regelverk. Strength skal i hovedsak omhandle globale og lokale styrkeanalyser, og materialvalget kan ha større innvirkning på dette. Avslutningsvis skal style, skipets utseende, vektlegges som et av kravene for oppgaven. Fartøyet skal betjene en rolle for cruiseturismen, og det vil være viktig å lage et design som ikke er sjenerende i miljøet.



Figur 4.2: Designspiralen.

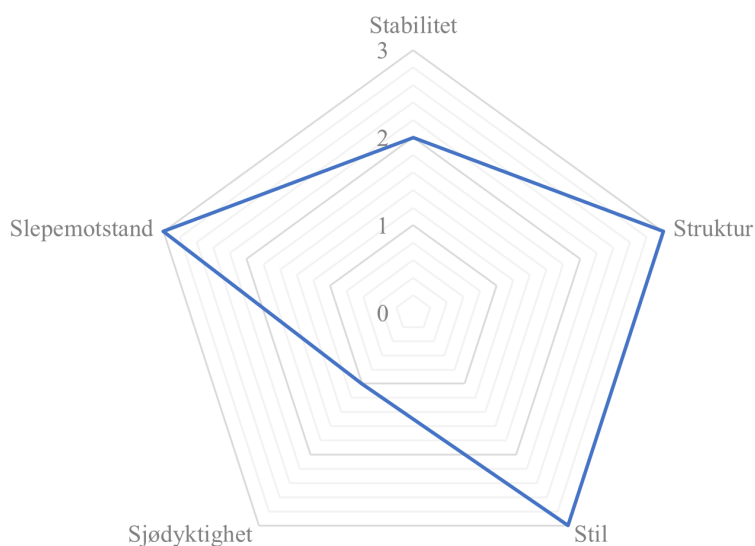
Selv om elementer i denne prosessen vil basere seg på David Andrews mer detaljerte designmetodikk, vil designspiralen ligge til grunn. Designspiralen understreker hvordan initielle krav og funn legger et grunnlag for mer detaljerte og begrunnede valg senere. Enkle krav, funn og statistikk kan gi en god start, og iterativt vil et godt datagrunnlag dannes. En visuell beskrivelse av designspiralen er beskrevet i Figur 4.2. Målet for oppgaven er å utføre denne prosessen to til tre ganger for best utbytte.

4.2 Strategi

En arbeidsprosess som kreves for denne prosjekteringen blir ofte kalt for en bottom-up metode. Som begrepet tilsier må det startes på bunnen med et behov, og deretter bygge videre oppover i strukturen med dette som utgangspunkt. I de fleste designprosesser kan dette bli overflødig da gode design og analyser allerede er gjort. En løsning da er å designe top-down. I disse sammenhengene kan rederen gjøre store besparelser i investeringsfasen da arbeidet går raskere og enklere. Dette blir det omvendte av bottom-up og har egne respektive fordeler. Siden det er lite å basere seg på av kjent data, er ikke denne metoden aktuell for denne oppgaven.

Fordeler med bottom-up er større rom for innovasjon og mulighet for radikale endringer fra skipstypens norm. Det er også større ulemper forbundet med denne designmetoden. Inntog av nye innovasjoner kan introdusere nye feil og mangler. Prosessen krever også et langt større bruk av ressurser, og dette medfører ofte større kostnader mot top-down metoden. Det vil også være en underliggende usikkerhet vedrørende fartøyets operasjonelle karakteristikk. Siden det er lite data å basere seg på, vil ikke den endelige karakteristikken være kjent før fartøyet settes i drift.

Basert på framgangsmetoden og strategien kan prioritet på de fem fagområdene vektet ut fra oppgaven, målsetning og kompetanse. Figur 4.3 viser denne vektingen. Karakter 3 tilsier at fagområdet ska vektlegges mest, og karakter 2 betyr det skal utføres, og karakter 1 er arbeid som gjennomføres om tiden tillater det.



Figur 4.3: En overordnet strategi med de fem fagområdene og graden av prioritet.

4.3 Bottom-up analyse

Første steg i designprosessen er å lage en oversikt over alle nødvendige komponenter som må til. Disse grupperes videre til større blokker som brukes til å danne en overordnet struktur over fartøyet. Når det designes fra bunnen av, vil komponentene være *årsaker*, og skroget vil være en *konsekvens* av disse. Skrogutforming blir neste steg etter denne oversikten.

Energy storage systems	Energy storage units	Flywheel units	
		Connection cables	
	Power controls	Power control room	
		Charging cables	
Ship systems	Machinery	Emergency generator	Fuel tank
			Starter battery
			Genset
	Maneuvering	Azimuth thrusters	
		Bow thruster	
	Tanks	Ballast	
	Safety	Raft	
		Anchor	Anchor
			Chain
		Windlass	
Controll and crew	Bridge	Crew area	
		Crew head	
		Control station	
Mooring	Deck storage		
	Automatic mooring		

Figur 4.4: Skipets taksonomi med relevante grupperinger.

Figur 4.4 viser en oversikt over skipets systemer fordelt mellom undersystemer relatert til skipets egen drift, og energilagringssystemene. Videre er systemene fordelt ned til sammensetninger av komponenter, og enkeltkomponentene. Systemene og komponentene kan videre defineres til blokker som settes sammen i en 3D-oversikt for visualisering av systemers sammenkobling, vektfordeling, og volum. Systemenes oversikt ligger i Vedlegg C.

5 Skrogutforming

Grundig analyse for skrogvalg er nødvendig. Det er lite data å basere seg på, og derfor kreves et selvstendig arbeid fra begynnelsen av. Viktigste og første parameter er fartøyets hoveddimensjoner. Sertifikater, regelverk og andre krav kan ha innvirkninger på dette. Utover dette kan statistikk for skip med lik last og størrelse være nyttig. Generelt sett finnes det noen grunnleggende prinsipper å støtte seg på. Disse gir gode ledertråder mot det optimale skroget.

5.1 Hoveddimensjoner

- Skipets lengde (L) er en viktig parameter som påvirker skipets karakteristikk. Denne parameteren gir skipet dynamisk karakter, og påvirker dets evne til å bevege seg gjennom vannet i tillegg til å gi stabilitet. Derfor er lengden essensiell når det designes og bygges skip.
- Bredde (B) på skipet er en viktig parameter som påvirker skipets stabilitet og arbeidsflate på hoveddekket. Et bredere fartøy vil generelt sett være mer stabilt i sjøen, men samtidig vil bredden også påvirke skipets manøvreringsevne og tilkomsten i visse farvann. I slike tilfeller finnes det en maksimal bredde skipet kan ha. Et bredere skip har også på generell basis større motstand mot vannet, noe som kan påvirke skipets hastighet og drivstofforbruk. En god balanse for bredden er derfor viktig.
- Dybde i riss (D) er et parameter som gir informasjon om skipets innvendige lasterom. I tillegg til dette danner det, sammen med dypgangen, grunnlaget for tilgjengelig fri bord.
- L/B -forholdet, forholdet mellom skipets lengde og bredde, er en viktig parameter som gir informasjon om skipets dynamiske egenskaper. Et høyt L/B -forhold vil gi bedre sjøegenskaper som høyere fart og mindre pitch-bevegelser i sjøen. Et lavere L/B -forhold gir derimot et mer stabilt skip med økt motstand. Dette kan medføre redusert fart og manøvreringsevne. Dette forholdet må derfor være godt balansert.
- L/D -forholdet gir et forhold mellom styrken og belastningen i skroget. Dette forholdet kan påvirke skrogets motstand mot deformasjoner og bøyning. Et høyere L/D -forhold kan gi større momenter i skrogbjelken, som er den styrkegivende delen av skipet. I omvendt tilfelle kan et lavt L/D -forhold gi et sterkere skrog og bedre motstand mot bøyning og deformasjoner. Derfor er denne relasjonen mellom styrke og belastning viktig å dimensjonere riktig.
- Blokkoeffisienten (C_b) gir informasjon om skipets deplasement og motstand. Koeffisienten beskriver hvor mye skroget fyller sin omgående blokk. En lavere C_b indikerer et skip med lavt deplasement og slanke former, en høy C_b indikerer det omvendte. Fyldigere skrog vil kreve mer effekt. For lasteskip er denne parameteren ofte mellom

0.6 og 0.8 avhengig av last og størrelse.

- Dypgangen (T) er en viktig parameter som kan påvirke skipets ytelse og sjødyktighet på flere måter. Det bestemmer hvor grunne områder skipet kan gå i. Samtidig kan en liten dypgang føre til begrenset rom til en stor nok propell. Om diameteren på propellen må reduseres som følge av lite rom, kan propellvirkningsgraden bli lavere og det totale systemet vil kreve mer energi.

Dypgangen kan også påvirke skipets GM-verdider ved å endre skipets KB, som er viktig for stabilitet. Det kan også ha innvirkning på GZ-kurven da en stor dypgang kan redusere den kritiske vinkelen GZ_{max} .

5.2 Aktuelle skrogtyper

Et fartøy sin skrogutforming er basert på en rekke interne og eksterne faktorer. Fartsområdet vil si hvor sjødyktig fartøyet bør være og hvilke sikkerhetskrav som må følges, mens fartøyets funksjon eller last vil diktere nødvendig stabilitet. Hastigheten til et skrog kan også deles mellom planende og ikke-planende skrog avhengig av om skroget gir mer oppdrift i hastighet som overkommer fartøyets egen vekt. Et fartøy som skal frakte tung last på varierte dypganger, vil måtte kreve et skrog som er effektivt i flere dypganger.

Den mest ordinære skrogtypen er fartøy med ett enkelt skrog, også kalt monohull. De har god sjødyktighet og et stort vannplansareal som gir minimal endring i dypgang ved endring av last. Variasjon i dypgang er også avhengig av formen på skroget, om det er fyldig eller slankt skrog. Et godt eksempel for dette prosjektet er lasteskip som tankskip. De bærer en last som ikke krever store dekksluker, kan holde stor vekt, og holdes effektive i dypganger med og uten last.



Figur 5.1: Kystbunker [46].

Enkeltskrog er lett å skalere opp eller ned uten å gjøre signifikante endringer på skrogets utforming eller konfigurasjonen av systemene om bord. Skalering i L/B-forholdet vil påvirke faktorer som stabilitet og slepemotstand. Fartøyet i Figur 5.1 er et eksempel på et kystgående fartøy som kan utnytte et høyt deplasement med en skrogform som lett kan skaleres opp, mens fartøyet i Figur 5.2 har veldig lik skrogform i en mye mindre størrelse.



Figur 5.2: Grip Tank [47].

En mer spesialisert skrogtype er dobbelskrog, som også blir kalles katamaran. Disse skrogene er mer kompliserte å produsere, men har fordeler som økt stabilitet uten å ha like mye motstand som et monohull med samme bredde og lengde. Med den økte bredden får en katamaran, som i Figur 5.3, en stor dekkflate som gjør de aktuelle til bruk som passasjerbåter og mindre arbeidsbåter.



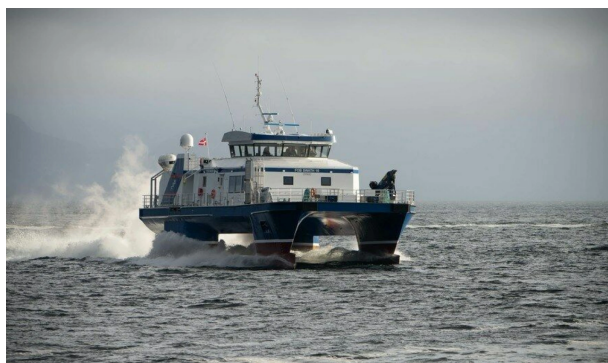
Figur 5.3: Fredrikke Tønder Olsen [48].

Katamaraner er typisk som passasjerbåter fordi de kan utformes som planende skrog, og vil oppleve lite endring i dypgang med og uten passasjerer. Katamaraner har et lite vannlinjeareal som gjør de ugunstig for stor variasjon i laster. Det finnes også katamaranskrog utformet for tyngre, saktegående fartøy som kan bære stor last som fartøyet i Figur 5.4.



Figur 5.4: Frøy Harvest [49].

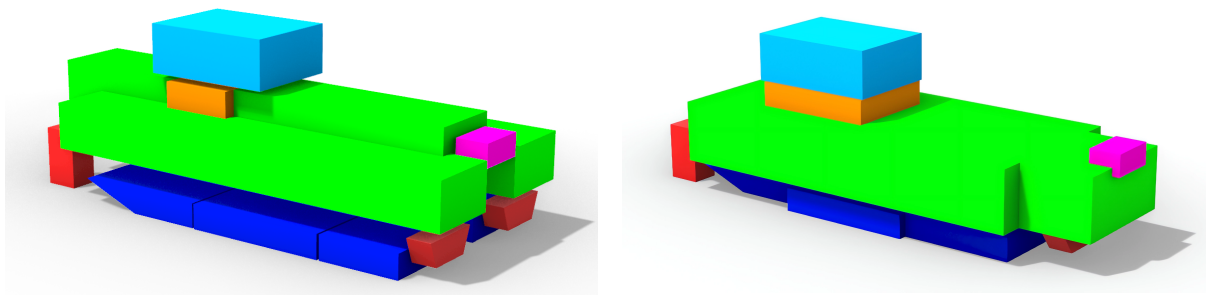
En annen form for dobbelskrog er SWATH, Small Waterplane Area Twin Hull, som er godt egnet for fartøy med konstant dypgang og som ønsker reduksjon i bølgerespons. Vannplanet til skroget er så lite at det blir minimal endring i oppdrift gjennom bølger, som gir skrogtypen en unik egenskap. Fartøyet i Figur 5.5 er et godt eksempel på en hurtiggående SWATH, som ikke vil kunne bære en stor variasjon i dødvekt.



Figur 5.5: FOB Swath 10 [50].

5.3 Valg av skrogtype

Informasjonen fra bottom-up analysen brukes til å sette sammen en tredimensjonal blokk-generalarrangement (GA) hvor alle elementene organiseres på mest praktisk vis som vist i Figur 5.6. Dette kan tidlig avsløre designmessige utfordringer som vil oppstå videre i prosjekteringen. En godt sammensatt blokk-GA gir det første grunnlaget for å utforme et skrog. I dette stadiet er blokkenes størrelse basert på konservative antakelser. Da flere skrogtyper kan velges lages det en blokkstruktur med både enkeltskrog og multiskrog.



Figur 5.6: En overordnet blokk-GA for to skrogformer. Venstre er et multiskrog og høyre er et enkeltskrog.

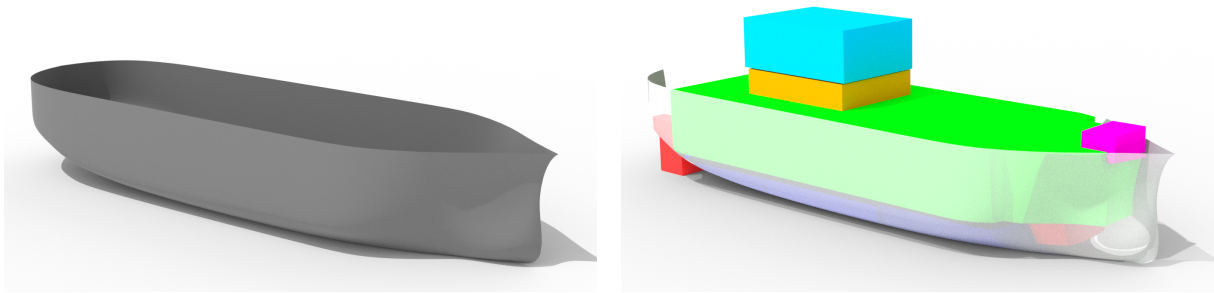
Da dette er den initielle prosessen er det gjort forenklinger, og det vil forekomme mangler på dette stadiet. Metoden vil fortsatt gi god uttelling da de største og viktigste komponentene er med i blokk-strukturen.

Detaljutforming av skrog

For valg av skrogtype vektlegges lastekapasitet, hydrodynamiske egenskaper, og stabilitet. Som begrensning på lengde av skroget er det satt 24 meter som maksimal LOA for å komme under sertifikatgrenser til D6. Dermed vil fartøyet bare kunne skaleres i bredde og dybde for å romme nødvendige systemer.

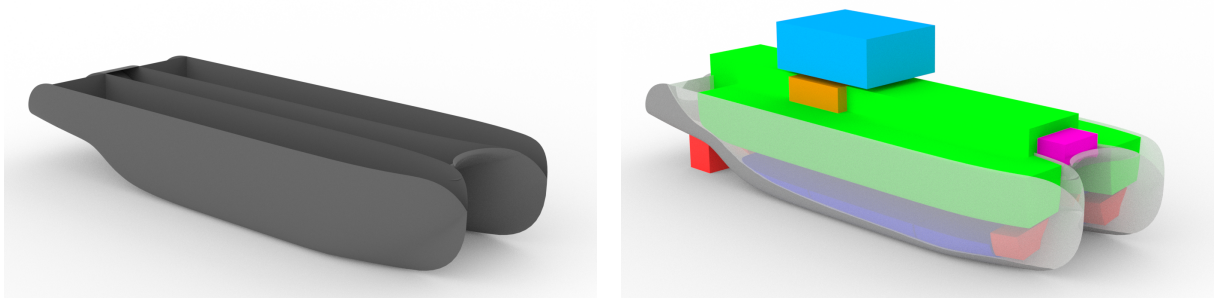
Et krav satt til designet er at alle energilagringseenhetene skal være enklest mulig å skifte ut gjennom luker i dekket individuelt. Oppkobling til enhetene er på undersiden av enhetene. Derfor kreves det at ingen enheter plasseres over hverandre. Det skal være tilgang til minst en av sidene til hver enhet. Det velges som utgangspunkt å designe for 60 enheter som en konservativ videreføring av Grønn Kai-prosjektet.

Med et monohulldesign som i Figur 5.7 betyr det store arealkravet til energilagringseenhetene at skroget får en bredde på minimum 6 meter og veldig stor fyldighet. Fordelen er at konstruksjonen er enkel og passer godt til deplasementskrog. Massetettheten på lasten (energilagringseenhetene) inkludert oppkobling og støttesystemer er rundt 0,5 tonn per kubikkmeter, som tilsvarer mer en volumlast enn en vektlast. Et smalt skrog kan gi stabilitetsutfordringer og kan derfor begrense friheten til vertikal vektfordeling.



Figur 5.7: Monohull og blokkstrukturen tilpasset skroget.

I en katamaran som i Figur 5.8 med samme lengde og total bredde på neddykket skrog (3+3 meter), vil fartøyet sin bredde bli mer fleksibel ved å variere bredden på tunnelen mellom skrogene. Dermed kan fartøyet ha en større total bredde hvor tunnelspennet skaleres etter behov. Dette gir et mye større areal å plassere energilagringseenhetene på. Flexibiliteten tillater løsninger som gjør det lettere å fjerne deler av overbygget for utbytting av enheter.



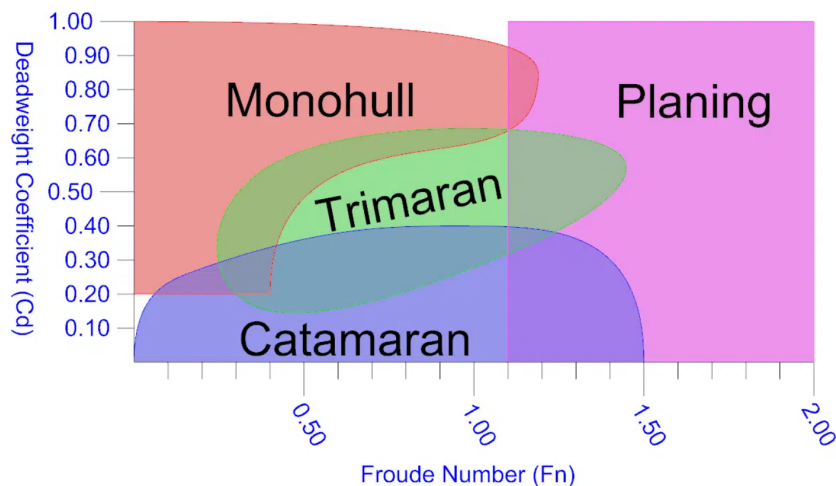
Figur 5.8: Katamaran og blokkstrukturen tilpasset skroget.

Det unike med lasten i dette lasteskipet, er at det vil ha konstant dypgang uansett lastekondisjon. Siden energilagerene har en relativt lav massetetthet, kan derfor en katamaran fungere. Toppen av tunnelen kan plassere lavt, for å gi strukturen mellom skrogene ekstra volum og styrke. Lagringsenhetene kan plasseres høyere uten å påvirke stabilitet betydelig siden katamaranen har naturlig god formstabilitet. Det er dermed en rekke fordeler ved å bruke et katamaranskrog, og skrogtypen bør vurderes til videre prosjektering.

SWATH kan være en god skrogtype med sine gode egenskaper med redusert bølgerespons. Dette kan være godt egnet for de roterende svinghjulene i energilagringseenhetene som er sensitive for bevegelse. Formen på skroget gjør at alle større komponenter må plasseres høyere i skroget. Resultatet blir et høyt hoveddekk, høyt tyngdepunkt, og en avansert konstruksjon. Design fra bunnen av gjør denne skrogformen til et risikabelt valg grunnet få lignende anvendelser. Derfor uteblir SWATH fra vurderingen.

I en bølgeanalyse tyder det på at forskjellen mellom de to utkastene til skrogdesign i form av monohull og katamaran ikke er betydelig med tanke på bølgedannelse. I høyere hastighet vil monohull skroget gi høyere bølger og lavere motstand, og i samme hastighet vil

katamaranen få høye bølger mellom skrogene sine og noe mer motstand. Dette vil sammen med ønsket motoreffekt gi en indikering på gunstig toppfart og marsjfart, men disse hastighetene kan ikke fastslås før det er gjort presise skalaforsøk i slepetank. Skrogene har også veldig ulik KM som kan være avgjørende om lasten må stå høyt. Data på dette stadiet finnes i Vedlegg D.



Figur 5.9: Diagram for valg av skrogform basert på dødvekt og Froudetall. Hentet fra DMS Marine Consultant [51].

Et hjelpemiddel i valg av skrogform er diagrammet i Figur 5.9 fra DMS Marine Consultant, en veiledning basert på Froudetall og dødvætskoeffisient. Fartøyets Froudetall er 0.27 i hastighet på 8 knop med antatt lengde 24 meter, med forbehold om fartsvariasjoner. Dødvætskoeffisienten blir et definisjonsspørsmål. Energilagringseenhetene ombord vil være fast montert gjennom all normal operasjon av fartøyet, og kan defineres som en del av skipets lettvekt. Skipets dødvækt vil i praksis kun bestå av nødgeneratorens drivstoff og potensielle ballasttanker. Dette gir en dødvætskoeffisient svært nær 0. Diagrammet indikerer da at katamaran er anbefalt.

5.4 Konkludert skrogtype og hoveddimensjoner

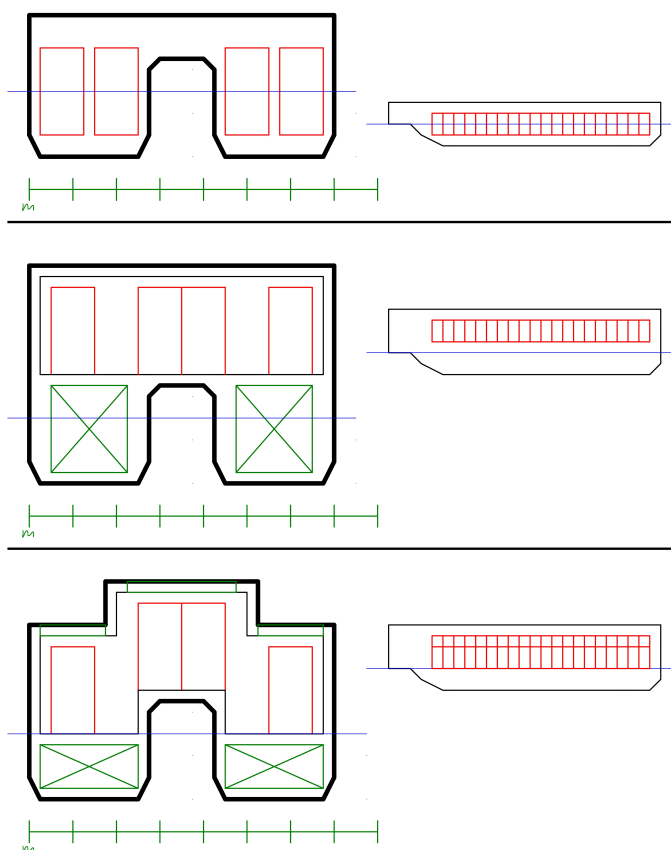
Det velges å gå videre med katamaran som følge av vurderingen. Den nærmeste skipstypen som kan brukes til inspirasjon er arbeidsbåter med katamaranskrog. Disse fartøyene er ofte laget med en begrensning i lengde, har stort dekkareal for last og utstyr, og god stabilitet for kranoperasjoner. De er laget for lave hastigheter uten planing, og har god manøvreringsevne. Derfor er arbeidskatamaraner en god sammenligning som deler mange av de samme trekkene til prosjektets fartøy.

Fartøyet vil optimalt være en fyldig katamaran med en maksimal lengde på 24 meter for å holdes innen D6 sertifikat, og kan skaleres i bredden om det skulle kreves større areal til last og systemer. Design av baug og akterende kan utformes kreativt, så lengde det

neddykkede volumet holdes så dynamisk effektivt som mulig.

Med en satt lengde på rett under 24 meter, og et kjent volum til energilagringseenhetene, kan det fastslås en fornuftig bredde til hvert halvskrog og total bredde. Med de nåværende kravene for tilgang til energilagringseenhetene vil hvert demiskrog trenge en bredde på omtrent 3 meter, og en tunnelbredde mellom skrogene på minimum 2 meter for å få plass til flere enheter over tunnelen. Dette gir minimumsverdi til totalbredden på 8 meter. Fartøyet kan fortsatt skaleres i bredden for større kapasitet om prosjekteringen krever det.

En rekke metoder av inndelinger for fartøyets interne systemer vurderes. Energilagringseenhetene må antas å bidra til stor påvirkning av VCG. Om det skulle være nødvendig med store tanker til ballast, eller bære ferskvann, kan det også vurderes en inndeling som tillater mer volum for tanker i nedre skrog. Det må også legges til grunne kravet om tilkomst til hver enhet. Ulike forslag er presenter i Figur 5.10 Det vil kreves fire enheter i bredden for å få plass til 60 moduler, basert på utgangspunktet:

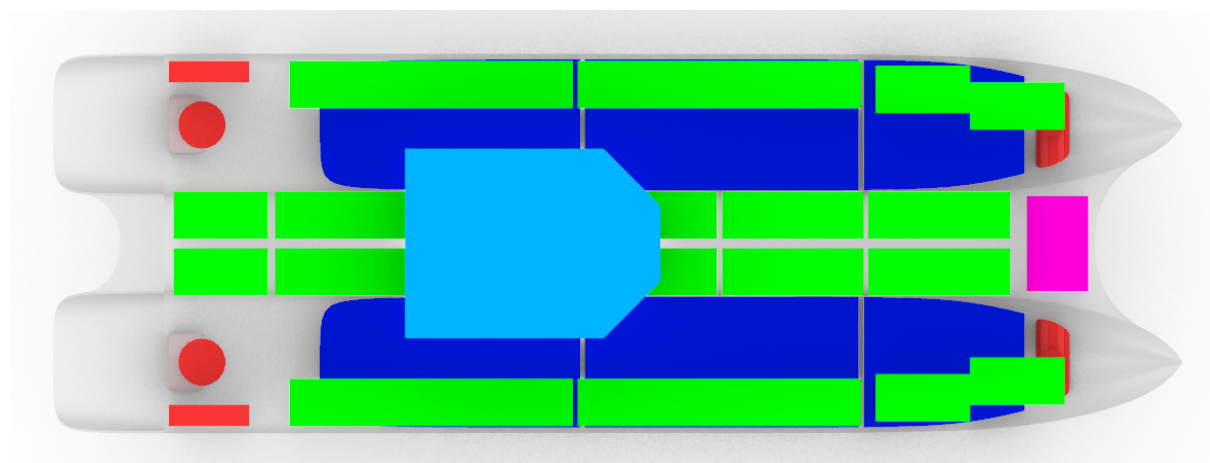


Figur 5.10: Initielle skisser over inndeling av skrogets innhold.

- Den første av illustrasjonene i figuren har et lavt tyngdepunkt, men ingen plass for tilkomst til vedlikehold, eller plass til tanker.
- Den andre inndelingen har god tilkomst, og store tanker, men får et høyt tyngdepunkt.
- Den tredje av inndelingene har en kombinasjon som plasserer de to radene med energilagringseenheter i senter over tunneltaket, og de ytterste radene på en lavere tanktop. Dette gir plass til tanker, men plasserer også VCG lavere.

Innledende antas en lettskipsvekt på 40 tonn basert på 20 tonn skrogvekt og 20 tonn signifikante vekter, basert på blokkene som vist i Figur 5.11. Hver energilagringseenhet veier 1,2 tonn. Samlet gir det et totalt deplasement på omtrent 110 tonn. Blokkoeffisienten bør ligge i intervallet mellom 0,6 og 0,7, som vil tilsi et slankt og dynamisk skrog. Intensjonen

blir å holde lengden ved 24 meter og minimum 6 meter vannlinjebreidde. Dette utgangspunktet krever en dypgang på 1,0 til 1,2 meter.



Figur 5.11: Videreutvikling av blokkstrukturen med spesifikke komponenter og valgt skrogform.

5.4.1 Baugutforming

Med følgende dimensjoner utformes første utkast av et skrog. Fartøyet skal gå i et område med svært rolig sjøtilstander, og vil dermed ikke ha et substansielt krav for sjødyktighet. Dermed kan utformingen av baugen fokuseres på effektivitet i fast dypgang mer enn bølgebrytning. Siden dypgangen er fast kan også en bulb gi ytelsesforbedringer. Et forsøk på å utforme dette kan derfor være relevant.

5.4.2 Akterskipsutforming

I utforming av akterskipet vil igjen reduksjon av motstand være det største fokuset. Av denne grunn unngås et neddykket akterspeil, men volumet må utnyttes på en god og praktisk måte uten å overskride lengdekravet på 24 meter LOA. Akterskipet skal også utformes mest optimalt for nødvendig propulsjonsløsning som sikrer god manøvreringsevne.

5.5 Endringer

Som følge av designspiralens gang har skrogformene blitt endret. En analyse av skrogets sjødyktighet og et modellforsøk har medført nye former i akterskipet og tilførselen av en bulb. Endelige tegninger inneholder disse elementene.

6 Valg av konstruksjonsmateriale

Det er flere muligheter når materialer skal velges til et fartøy som dette. Blant skipene som ble analysert i forkant av skrogutformingen er det brukt tre typer konstruksjonsmaterialer. Grip Tank, Kystbunker og Frøy Harvest er bygd i stål. Fredrikke Tønder Olsen er bygd i karbonfibersandwich. FOB SWATH er bygd i aluminium.

De fleste av skrogene nevnt i seksjon om skrogvalg er konstruert i stål, men dette materialet utelukkes fra vurderingen. Årsaken er at disse skipene ofte er bygd for å beherske andre fartsområder, restriksjoner og sjøkondisjoner. I slike sammenhenger er stål mer aktuelt da stål kan gi sterkere skrog til en rimeligere kostnad. I denne designprosessen vil restriksjonene og fartsområdet være vesentlig lavere, og disse aspektene blir derfor mindre betydelig. Dessuten er det viktig å redusere vekt for lavere dyppgang, som reduserer energiforbruk i transit og øker lastekapasitet. Derfor er det valgt å gå videre med aluminium eller karbonfiber som konstruksjonsmateriale.

Aspekter som må betraktes når materialtypen skal velges er i hvilken grad materialet vil redusere strukturvekten. Volumet til konstruksjonen vil også ha en betydning. Dette omhandler hvor tykke vegger skroget må ha, eller hvor store stivere som må sveises inn. Materialkostnaden vil også ha en innvirkning på hvor attraktivt prosjektet blir. Dette er også tett forbundet med produksjonskostnadene.

Avslutningsvis er graden av kompleksitet når det skal styrkeberegnes essensielt. For oppgavens del behøver ikke dette vektlegges i detalj, men ideelt bør hele konstruksjonen styrkeberegnes og klasseres korrekt. I denne sammenheng er det ikke like enkelt med komposittmaterialer hvor en totalanalyse av mange styrkemessige scenarier må betraktes. Kompleksiteten til råmateriale vil også ha stor innvirkning. Fiberretning og type kjerne-materiale kan gjøre denne prosessen svært kompleks og numeriske analyser blir nødvendig. Til sammenlikning kan aluminium beregnes enklere med manuelle beregninger og støtte fra DNV's egne programvare.

6.1 Aluminium

Aluminium er et materiale godt egnet til skipsbygging da det er lett og sterkt. Noen av de viktigste egenskapene er god korrosjonsbestandighet, et høyt styrke-til-vekt-forhold og god formbarhet. I skipsbygging er aluminium spesielt egnet for mindre skip da det gir rom for større vektbesparelser, men kan også brukes til større skip med riktig design. Aluminiumsskrog kjennetegnes ved bruksområder hvor høy fart, lavere drivstofforbruk og enkelt vedlikehold er ønsket. Materialet er derimot mer utsatt for mekanisk slitasje [52].

Ulempen med aluminium er materialets mykere egenskaper forbundet med den lave E-modulen, typisk 70 000 MPa [53]. Dette kan medføre større deformasjoner og utbøyninger i konstruksjonen, noe som krever mer avstivning. Følgene dette gir kan være begrensede vektbesparelser. Rent teoretisk vil tettheten i forhold til stål gi besparelser opp mot 65%. Som følge av større utbøyninger som krever avstivning, vil besparelsene være lavere enn

dette i praksis.

Legeringer er sammensetninger av metaller og øvrige grunnstoff for å fremkalle gitte egenskaper i et metall [54]. Målet kan være å øke styrken, hardheten eller korrosjonsbestandighet. Det er også andre typer egenskaper en legering kan fremkalle for å gjøre bearbeiding enklere. Legeringer gir muligheter innenfor konstruksjon hvor ekstra egenskaper er fordelaktige. I skipskonstruksjon hvor vektbesparelser er ønsket brukes ofte 5083-aluminium eller 5086-aluminium. Disse legeringene er egnet for sveising og har god bestandighet mot saltvann og kjemikalier. Legeringene består hovedsakelig av aluminium sammen med andre tillegg som magnesium og mangan [55] [56]. Legeringer kan medføre et tillegg på materialkostnadene, men riktig legering kan gi mindre behov for materiale som reduserer produksjon- og driftskostnadene.

6.2 Karbonfibersandwich

Karbonfiber er et sterkt og lett materiale som består av tynne tråder eller fibre av sammenvevde karbonkjeder. Materialet har høy stivhet og god holdbarhet. Materialet er også svært motstandsdyktig mot korrosjon. Karbonfiber har god holdbarhet i anvendelser hvor det eksponeres for høy varme. Muligheten for å gjøre større besparelser på strukturvekt er svært attraktiv i applikasjoner med høy hastighet. Derfor er karbonfiber ofte brukt til hurtigbåter og andre mindre planende båter. Lav vekt bidrar til besparelser av drivstoff og driftskostnader. Prisen på materialet er derimot høyere enn alle andre alternativ, og i de fleste anvendelser må dette kompenseres med lavere driftskostnader som nevnt over.

I praktiske anvendelser brukes karbonfiber i en kompositt. En kompositt er et materiale som er sammensatt av to eller flere forskjellige materialer med ulike egenskaper. Disse materialene kan være sammensatt ved å veve sammen materialene, ved å støpe de sammen, eller ved å påføre et materiale over et annet.

Systemet deles ofte inn i to hovedkomponenter: fiber og matriks. Fiberen kan bestå av flere materialer, men i karbonfiberkompositt er dette vevde matter i ren karbonfiber. Matriksen er en limaktig substans som binder fiberen sammen. Matriksen består ofte av polyester, vinylester eller epoksy. Sammen danner komponentene et materiale som fremkaller hver komponents styrker. I helhet blir det et sterkt, lett og holdbart system.

I seg selv er en karbon-kompositt svært sterk og lett. Det er derimot vanlig å bygge større konstruksjoner med en sandwich-sammensetning. Dette er en type konstruksjonsmateriale som består av to lag karbon-kompositt limt sammen med et indre kjernemateriale. Kjernen består ofte av skummaterialer, en heksagonal struktur eller en lett tresort. Hovedformålet til kjernen er å bidra til strukturell styrke og stivhet for den totale konstruksjonen. Ved å skille karbon-kompositten med en kjerne mellom, vil konstruksjonens motstandsmoment øke da hver enkelt komponent er forskjøvet fra den lokale nøytralaksen. Dette øker lokal styrke mot sjøtrykk.

6.3 Styrkeanalyse

En styrkeanalyse for konstruksjoner i metaller må deles inn i lokale og globale analyser. Global styrkeanalyse av skip er viktig for å sikre at skrogbjelken tåler ytre påkjenninger av krefter og bøyemomenter som oppstår. Det legges til grunn metoder som er basert på generell bjelketeori hvor det kreves et motstandsmoment som kan motstå globale momenter under tillatte spenninger i konstruksjonsmaterialet. Lokal styrke er også viktig å undersøke. Her betraktes overgangen mellom interne laster og ytre påkjenninger fra bølger og sjøtrykk. Det må kontrolleres tilstrekkelig styrke i lokale element. Kraftgangen fra plater til stivere må fullføres med en sterk nok bærerstruktur.

I komposittkonstruksjoner er det ikke alltid like enkelt å benytte bjelketeori for å beregne styrken. Dette skyldes at materialet ikke er uniformt og at dette vil gi avvik i analysen. Derfor er det vanlig å benytte seg av mer komplekse teknikker, som for eksempel totalanalyser av konstruksjonen i helhet og dataassisterte FEM-analyser.

FEM-analyser er en metode som brukes for å beregne styrke og deformasjon i konstruksjoner. Metoden baserer seg på at konstruksjonen deles inn i mange mindre elementer, og beregner styrke og deformasjon i hvert enkeltelement. Videre kan dette settes sammen for å få et totalt inntrykk av konstruksjonens helhetlige styrke. FEM-analyser krever et godt datagrunnlag, gode randbetingelser og kan kreve mye tid og datakraft. Til gjengjeld vil en godt utført analyse gi svært gode resultater [57].

Metoden kan også benyttes til å finne det best mulige materialet og fysiske utforminger for gitte belastningskondisjoner. Da simuleres konstruksjonen i ulike belastninger og påkjenninger. Dette gjør at metoden også kan være et verktøy for å optimalisere struktur og vekt. Eksempler på dette kan være å finne optimal fiberretning i en komposittkonstruksjon, eller riktig radius i en kraftoverførende sammenføyning.

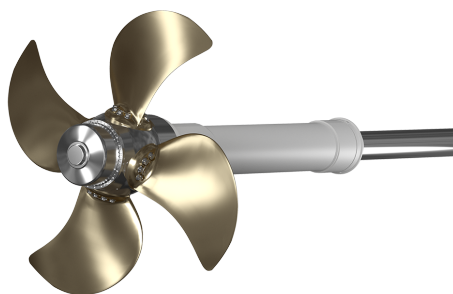
6.4 Konklusjon materialvalg

Det konkluderes at det prosjekteres videre med aluminium. Materialet tillater en simple prosess for struktur-analyser. Hybride løsninger med flere materialer kan forekomme i enkelte interne bæresystem. Med det menes et skrog lagd i en aluminiumslegering med andre materialer til energilagerets bærerstruktur og forankring. Eksteriør skal også vurderes i kompositt da store formede flater kan bli svært tunge i aluminium. I hovedsak skal det forsøkes og utarbeide hele strukturen i aluminium, men hybridløsninger kan være et alternativ.

Materialvalget tillater bruk av kjente metoder. Kompetansen på metalliske materialer er god, og metoden kan utføres i kjent programvare. Aluminium forventes å ha tilstrekkelig styrke i den gitte applikasjonen. Materialet tillater også en lett strukturvekt som er attraktivt når dypgang og skrogmotstand skal minimeres. Materialet ansees som holdbart både mot korrosjon og de mekaniske slitasjene dette fartøyet vil inneha. Kostnaden forventes også å bli lavere med aluminium til sammenlikning med karbonfiber.

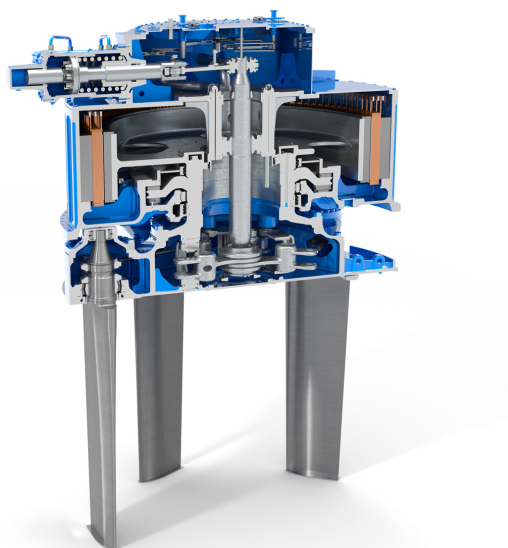
7 Propulsjon

Et skips propulsjonssystem er kjernen av dets funksjon, og kan konfigureres på mange måter. Hovedprinsippet er å skape en trykkforskjell foran og akter en del av fartøyet for å fremkalle en kraft som resulterer i fremdrift.



Figur 7.1: Propell [58].

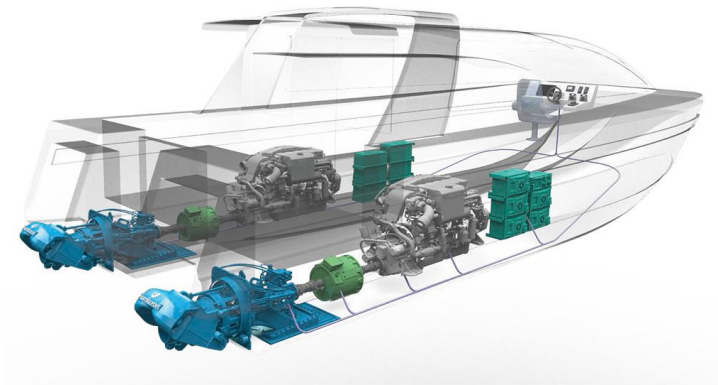
Den mest typiske fremdriftsmetoden for skip er propeller som vist i Figur 7.1. Propellen sin funksjon er å fremkalle en trykkforskjell ved rotasjon. Den har kurvede flater på samme måte som et seil, men må tilføres bevegelsesenergi fra fartøyet og ikke omgivelsene. Flere kurvede flater rotere rundt en fast akse. Flatene kalles propellblad, og skaper en trykkforskjell som gir fremdrift. Angrepsvinkelen på propellbladene omtales som “pitch” og kan enten være fast (FPP) eller variabel (CPP).



Figur 7.2: Voith Schneider Propell [59].

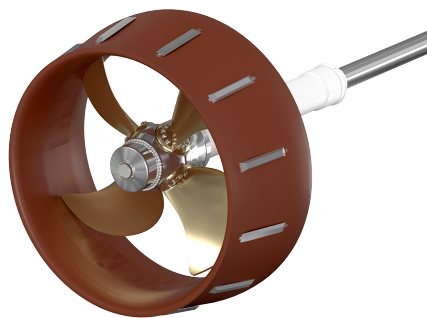
Propeller har blitt utformet i mange versjoner for forskjellige bruksområder, som den spesielle Voith Schneider propellen i Figur 7.2 som plasserer foil-blader parrallelt med rotasjonsaksen, kontra på tvers av rotasjonsaksen som en vanlig propell. De fleste propeller

har blader plassert på konvensjonell måte hvor det heller varieres i form på bladene, eller har en konstruksjon som kontrollerer vannstrøm rundt propellen. Fartøy som ligger mye på DP har god nytte av et system som kan endre retning av skyvkraft med lav responstid. Dette gjør at Voith Schneider propeller er mest brukt på offshorekip.



Figur 7.3: Waterjet [60].

Et eksempel på propell som innebygges i skroget er vannjet, hvor propellen er plassert i et rør, også kalt tunnel, som gjennom reduksjon av diameter øker trykket bak propellen. Det tillater en trykkøkning langt høyere enn en vanlig frittstående propell. Figur 7.3 viser en illustrasjon av to vannjetdrivlinjer. Vannjeter krever også en stor inngangshastighet av vann for å bli like energieffektive som vanlige propeller, så de er mest gunstig å bruke på hurtiggående fartøy.



Figur 7.4: Propell med dyse [58].

Det er også mulig å innkapsle en frittstående propell i en dyse som i Figur 7.4 med minskende diameter på samme måte som vannjeten. Dette gir en høyere propelleffektivitet. Dysen vil derimot gi sin egen motstand som motvirker tillegget i effektivitet. Dette gjør at propeller med dyse er mer gunstig for fartøyer som krever stor skyvkraft i lav hastighet, en tilstand hvor dysen har lav innvirkning på motstand. Eksempler på dette er slepebåter og trålere.

7.1 Autonom drift

Som en del av prosjektet skal fartøyet kunne konverteres til autonom drift på sikt. Det vil si at fartøyet i neste fase skal kunne kontrolleres fjernstyrt fra en lokasjon på land med minimalt av mannskap ombord. Videre skal det kunne operere uten noe mannskap ombord for daglig drift, og til slutt kunne operere seg selv uten noen menneskelig assistanse i daglig drift.

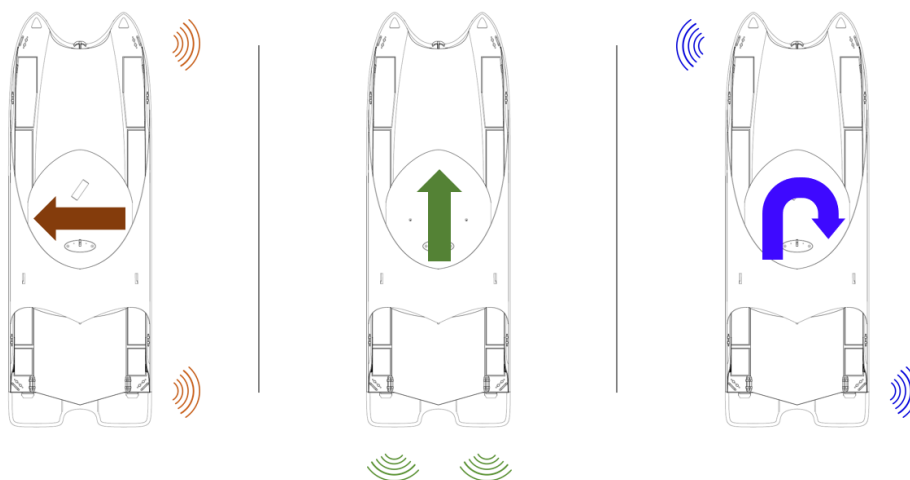
For at et fartøy skal kunne operere autonomt vil det kreve en mengde sensorer for å oppfatte omgivelsene sine og danne et situasjonsbilde under navigasjon. Dette vil i tillegg til ordinært navigasjonsutstyr som RADAR og GPS kunne kreve flere sensor-systemer som LIDAR og optiske kamera.

For at fartøyet skal være godt egnet til autonom drift vil det kreves propulsjon- og manøvreringssystem som gir god manøvreringsevne i alle retninger. Det vil si at det skal kunne utgi stor skyvkraft i alle retninger for å kompensere mot vind og bølger, og manøvreres på et begrenset areal.

7.2 Manøvreringsevne

Det ordinære valget for et katamaranskrog er å plassere egne drivlinjer i hvert av skrogene. Dette gir en større kompleksitet i og med det kreves to separate motorrom. To separate drivlinjer gir også redundans. En fordel med å kunne plassere to kraftvektorer bredt fra hverandre, er at de kan gi større utslag i manøvrering på grunn av den økte momentarmen rundt skrogets rotasjonspunkt.

Det bør tilrettelegges slik at fartøyet skal kunne bevege seg rett frem og bak, svinge rundt sin egen akse både stillestående og i bevegelse, og kunne bevege seg parallelt sidelengs. I kombinasjon med baug-thrustere i hver baug kan fartøyet få en enda større momentarm om rotasjonspunktet sitt.



Figur 7.5: Fartøyets tre frihetsgrader av propulsjon.

Baugthrusterne gir en skyvkraft rettvinklet ut fra skroget. Dette gjør at de bare er gunstig til tønning av baug med rotasjonspunkt i akterenden, eller for parallel sideforflytning av fartøyet. For parallel sideforflytning må det gies en lik skyvkraft fra akterenden rettvinklet ut til siden som vist i Figur 7.5. Dette vil kreve en type propulsjonsenhet i akterenden som tillater en skyvkraft i denne retningen. Propulsjonsenheter som vannjetter eller roterbare poder, også kjent som kompasstruster, kan tillate en slik skyvkraft.

Med to separate propulsjonsenheter plassert på hver side av akterenden kan hver av enhetene sende skyvkraft i hver sin retning fremover og bakover. Dette skaper et rotasjonsmoment rundt akterenden og vil rotere fartøyet. Dersom disse propulsjonsenhetene kan sende skyvkraft i separat retning kan de også brukes til å forskyve fartøyet parallelt sidelengs uten baugthruster. Dermed kan fartøyet ha to metoder for å bevege seg parallelt sidelengs, og fritt plassere rotasjonspunktet.

7.3 Valg av propulsjonssystem

Propulsjonssystem som Voit Schneider propell er aktuelt. I fremdrift har systemet god virkningsgrad, og manøvrerbarheten er svært god. Systemet er generelt kostbart sammenlignet med mer tradisjonelle propeller som vil møte minimumkravene til fremdrift og manøvrering.

Vannjet er et system som gir veldig god manøvreringsevne, men er typisk brukt på hurtiggående fartøy på grunn av den høye virkningsgraden i høy hastighet, men de har en lavere virkningsgrad enn tradisjonelle propeller i lave hastigheter. Siden fartøyet skal gå i lav hastighet med forutsigbar, effektiv, og pålitelig fremdrift, blir det ideelt med en form for propell.

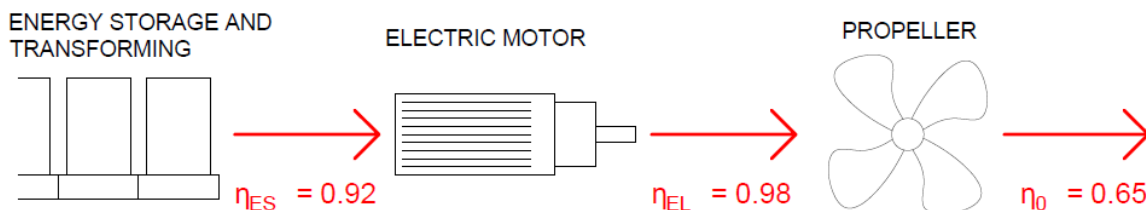
For at fartøyet på sikt skal kunne operere autonomt, vil det ha stor nytte av et propulsjonssystem som tillater så mye manøvreringsevne som mulig. Derfor velges det som hovedpropulsjon roterbare thrusterne på akterenden av hvert av skrogene. Disse vil kunne fritt sende skyvkraft i alle retninger uavhengig av hverandre. En fordel med denne typen propulsjonsenhet på katamaranskrog, er den økte avstanden mellom thrusterne som gir en større momentarm rundt rotasjonspunktet. En annen fordel er at strømminger fra hver enhet ikke påvirker den andre enhetene i like stor grad som ved et monoskrog.

Baugthruster i hver av de to baugene inkluderes for økt manøvreringsevne og redundans. Denne sammensetningen av propulsjonssystem gir fartøyet evne til å manøvrere med stor presisjon og skyvkraft i alle retninger for å kompensere mot vind og bølger.

Et manøvreringssystem som består av roterbare thrusterne i akterenden og baugthrusterne vil være optimalt for et slik fartøy. Oppsettet gir en balanse mellom kostnad og manøvrerbarhet. Når systemene skal være helelektriske vil de også kreve mindre plass enn et forbrenningsdrevet system. Elektriske kompasstruster består av to motorer, hvor den ene er plassert i skipet for å rotere enheten. Selve propellmotoren kan være plassert

i navet av propellen. Et slik system vil være svært kompakt, og tilleggsutstyret vil utgjøre majoriteten av volumet inne i skroget. Det velges en propell med fast pitch. Valget begrunnes med lav kompleksitet, kostnad og at thrusterene er roterbare. Fartsintervallet skipet skal operere i er også smalt og krever ikke store variasjoner i propellens form.

7.4 Tap i system



Figur 7.6: Kraftgang med virkningsgrader.

Fra Spinning Energy AS er det oppgitt en total virkningsgrad på uttak av energi fra svinghjulseneheten på 92 %. Elektriske motorer kan generelt sett ha en veldig høy virkningsgrad så lenge de har god kjøling. I dette systemet vil de elektriske motorene være en del av det eksterne systemet til thrusterne og få passiv og effektiv kjøling fra sjøvannet rundt. Det er derfor antatt en virkningsgrad på 98 % for de elektriske motorene. Illustrasjonen i Figur 7.6 viser kraftgangen med virkningsgradene.

Propellene blir frittstående propeller uten dyse eller annen omgående appendiks. De vil få en relativt ren strømming av vann over propellplanet, og antas å ha en virkningsgrad på 65 % i 8 knop. Tabell 7.1 og 7.2 viser alle de endelige virkningsgradene. Valg av videre detaljer i propelltype blir gjort basert på hvilke rotasjonshastighet de elektriske motorene går på med den optimale inngangseffekten, men generelt sett leverer produsenter av thrustere en komplett pakke med optimalisert propell for hele thruster-sammensetningen.

Tabell 7.1: Virkningsgrader til komponenter.

	Virkningsgrad
Energilager. η_{ES}	0.92
Motor. η_{EL}	0.98
Propell. η_0	0.65

Tabell 7.2: Total virkningsgrad i systemet.

Totalvirkninggrad. η_{tot}	0.59
---------------------------------	------

7.5 Dimensjonering av system

Etter valgt hovedpropulsjonssystem, gjenstår utredningen av hvor mye effekt og skyvkraft systemet skal yte. Basert på presenterte virkningsgrader og analyse fra empirisk analyse av slepemotstand, vil fartøyet kreve en samlet inngangseffekt på 315 kilowatt til motorene for å holde 8 knop hastighet i flat sjø og ingen vind. For å kunne holde hastigheten på 8 knop i flere værkondisjoner som motvind og bølger, og kunne yte større hastighet om nødvendig, vil det installeres en større motoreffekt. Med å bruke en inngangseffekt på 500 kilowatt til motorene (250 kilowatt per thruster), vil skipet kunne antas å holde 8 knop i de fleste værkondisjoner for området det er optimalisert for. I tillegg vil fartøyet kunne yte en toppfart opp imot 10 knop i flat sjø og ingen vind. Dermed konkluderes det å installere to stykk 250 kilowatt kompassthrustere. Systemtegning i form av single-line diagram er å finne i Vedlegg E.

8 Design

Visuelt design på skip spiller en viktig rolle når det kommer til fartøyet og rederiets oppfatning. Det estetiske avgjør mange elementer når eksterne skal visuelt oppfatte fartøyet. Godt design kan bidra til å tiltrekke kunder og gi et positivt inntrykk av fartøyet. Derfor må det skapes et design som kan reklamere godt for turismen i Geirangerfjorden. Samtidig må designet ta hensyn til funksjonalitet og tilrettelegge for effektiv drift. Alle fartøy er en arbeidsplass, og arbeidsmiljø er derfor viktig å vektlegge i denne fasen. En balanse mellom estetikk, funksjon og sikkerhet er derfor fokuset for å skape et vellykket og effektivt design.

8.1 Designkriterier

Ved å fastsette designkriterier kan videre arbeid gjennomføres med klare retningslinjer. Kriteriene definerer hva som er viktigst for sluttresultatet, og gir klarhet i hva som er mindre betydelig. Kriteriene kan også begrense risiko for feiltakelser og unngå kompatibilitetsproblematikk senere i arbeidet. Dette sikrer resultatet og bidrar til å møte kundens behov fra en tidlig fase.

8.1.1 Funksjonelt Design

En kjerneverdi i designprosessen er modularitet. Modularitet har stor innvirkning på det funksjonelle designet. Det betyr at fartøyet består av flere moduler som kan erstattes eller byttes ved behov. Dette gir økt fleksibilitet og tilrettelegger for enkelt vedlikehold. Broen skal designes som en enkeltmodul plassert øverst, og på sikt kan deler av denne fjernes om fartøyet skal driftes autonomt.

Energilageret skal også være lett tilgjengelig. Luker i hoveddekket til å heise ut energilagrene er derfor nødvendige. Sammen med disse funksjonelle aspektene kan den modulære designfilosofien gi et mer kostnadseffektivt design, da oppgraderinger og moderniseringer vil kunne utføres enklere. Det funksjonelle designet skal skape et skip som er enkelt og ryddig utformet. Målet er gode arbeidsforhold for mannskapet. Fordeling av komponenter må derfor planlegges godt. Type utrustning og dens plassering på fartøyet kan avgjøre om fartøyet blir enkelt eller utfordrende å arbeide på.

Modulariteten kan også sette begrensinger. Behovet for luker til alle energilagringssystemene og et styrhus som kan fjernes på sikt, vil snevre inn mulighetene. Å konstruere dette på best mulig funksjonelt vis uten å forhindre de visuelle kriteriene kan skape konflikter. Dette kan gi ukonvensjonelle designvalg. Muligheten for å dele det visuelle og funksjonelle i separate komponenter kan derfor være optimalt.

8.1.2 Visuelt Design

Harmoni med naturen er en viktig faktor i utformingen av fartøyets visuelle design. Målet skal være å gjenspeile fjordens skjønnhet og samtidig minimere den negative påvirkningen på nærmiljøet. Samsvar med designkriteriene skal også vektlegges. Det visuelle designet av fartøyet bør ha en positiv innvirkning på turismen. Målet er å skape en attraksjon i seg selv, og derfor er et estetisk tiltalende design betydningsfullt. Dette må skje uten å begrense tjenesten som skal utføres.

Utforming av det visuelle designet skal påvirkes av forskjellige elementer. Form, proporsjoner og farger er vektlagt for å skape et attraktivt design. Biomimikk og symmetri er brukt som hjelpemidler. Designkriteriet om naturlig integrasjon i omgivelsene tillater også overordnede elementer fra naturen, som fjellkjeder og andre nærliggende former. Vektlegging av disse elementene bidrar til estetisk harmoni og elegante visuelle inntrykk.

8.2 Designspråk

Når kriterier for et visuelt design er satt, vil det kombineres sammen til et totalt design-språk. Dette må bestå av et sett med regler som alle designbeslutninger bør legge til grunn. Det visuelle skal ha en minimal påvirkning på det funksjonelle, men ideelt sett bør selv visuelle elementer kunne tjene et praktisk formål. For eksempel karosseriet på en bil som gir et visuelt uttrykk, men beskytter også interne komponenter og tjener et aerodynamisk formål.

En stor del av hvordan et designspråk er bygd opp er sentrert rundt gradering og repetisjon av former. Med gradering menes endring i en form over seg selv. Dette kan være at en form har en endring i størrelse, retning, eller generell fasong. Dette kan kombineres med repeterende former. For eksempel et sett med gjentakende elementer som har en gradering i størrelse.

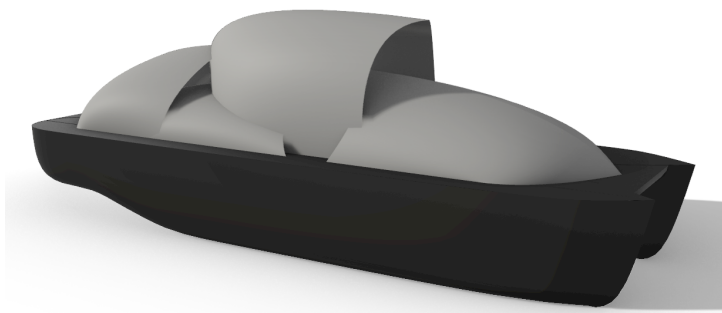
En form kan kommunisere sin funksjon gjennom at det trekkes assosiasjoner mellom form og funksjon. Skarpe former kan være aggressive, avrundede former kan være rolige, en kombinasjon av disse i en uniform retning kan gi et dynamisk formspråk. Totalt sett er den viktigste oppgaven til et visuelt designspråk å formidle den praktiske funksjonen.

8.3 Endelig Design

Fartøyet skal ha et dynamisk formspråk som formidler at det er et objekt i bevegelse. Hvor aggressive de dynamiske formene fremstår, danner et uttrykk for hva slags hastighet skipet skal bevege seg i. Derfor er det viktig at formene har en balanse som formidler bevegelse, men ikke hurtiggående fart.

Formspråket skal være inspirert av marint dyreliv med biomimikk som verktøy. Organiske

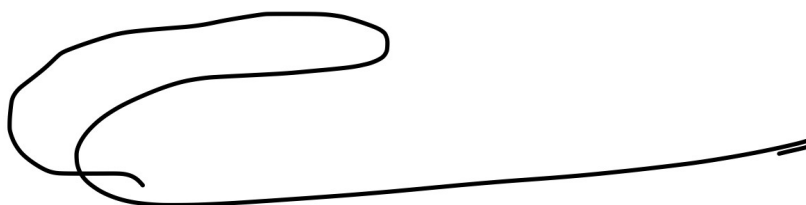
former fra naturen har ofte det dynamiske formspråket som dette skipet trenger, og det kan trekkes inn praktiske formål med formene.



Figur 8.1: 3D-modell av første konsept.

De funksjonelle designkriteriene tilsier en enkel konstruksjon med horisontale deksflater, og bruk av enkle former for å huse komponentene på innsiden og det modulære styrhuset. Slike former står i kontrast til et dynamisk og organisk formspråk, men en enkel løsning vil være å dekke over de funksjonelle formene med former som følger designspråket. Et sett med skall som dekker over strukturen til skipet kan formes nesten uavhengig av konstruksjonen under. Skallene kan trekke inspirasjon fra marint dyreliv som skalldyr, men også ha en formgradering inspirert av naturlige former som fjell. Et eksempel er vist i Figur 8.1.

Skallene har en visuell funksjon, de formidler det dynamiske og organiske formspråket, uten å påvirke stort de funksjonelle kravene. De vil også ha en praktisk funksjon ved å gi ekstra beskyttelse til strukturen under mot vær og vind. Strukturen under vil være den vanntette delen av skipet, mens skallene vil være en del av det modulære systemet hvor de kan lett demonteres for å få tilgang til strukturen under. På denne måten kan det være tilgang til lukene i dekket som gir adkomst til energilagringseenhetene.



Figur 8.2: Håndtegning av skrogformen.

Forming av skrogets visuelle design må også følge det etablerte formspråket. Det skal ha et dynamisk og organisk utseende, som henter igjen mye av de samme formene som overbygget. Siden skipet er en katamaran med to bauger og en senter-del som knytter skrogene sammen, velges det å utforme en sammenhengende linje som går fra hver baug og møtes i senter av skipet, som vist i Figur 8.2. Denne sammenhengende linjen i formen

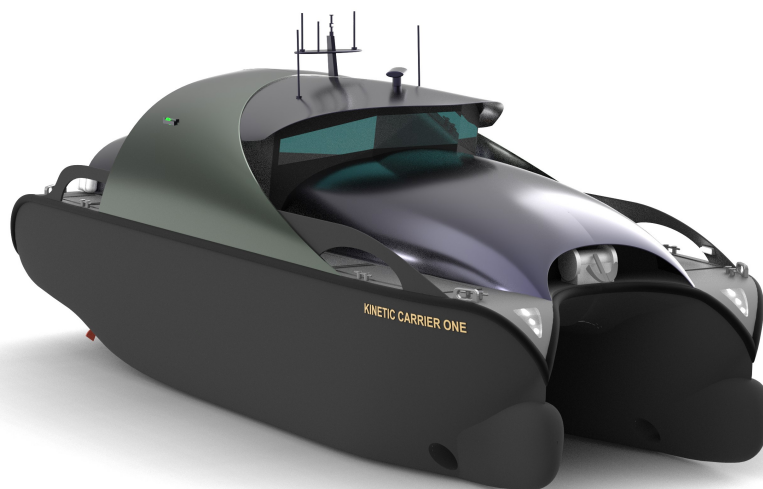
skal også forbindes i akterenden av skipet.



Figur 8.3: Skipets visuelle profil sett fra styrbord side.

Skallene på overbygget kan gi assosiasjoner til et skalldyr som beskytter sin skjøre deler med harde plater som fortsatt tillater bevegelse, eller et sett med rustning som beskytter brukeren, men fortsatt gir utsyn. På Figur 8.3 vises en sideprofil av skipet hvor man kan se vinduet til broen og styrhusets struktur. Styrhuset blir synlig fra utsiden, men er omgitt av skallene hvor det trengs utsyn gjennom vinduene. Styrhuset har et kantete og praktisk formspråk, og man kan lett skille mellom hvordan de organiske formene til skallen skiller seg fra styrhuset under, og ser på formene at de utgjør forskjellige funksjoner.

Skallene består av store kurvede flater. Kompositt som material blir derfor mest egnet for å unngå store tillegg i vekt. Fargevalget på skipet blir en kombinasjon av mørk blå og mørk grønn. Den mørke blå fargen symboliserer den dype fjorden, og den mørkegrønne fargen representerer kystlinjen og naturen som omgir den. Fargevalget gir en følelse av ro og balanse, og er behagelig for øyet. Denne kombinasjonen av farger vil integrere fartøyet inn i omgivelsene. Skipets totale visuelle uttrykk er presentert i Figur 8.4. Ytterligere visuell profil er vist i Vedlegg M.



Figur 8.4: Skipets visuelle profil.

9 Generalarrangement

Generalarrangementet (GA) er en 2D tegning som gir en oversikt over skipets overordnede utforming, dimensjoner, innredning, systemer og utstyr. Dette inkluderer hoveddimensjonene som lengde, bredde, dybde og dypgang. Plassering og dimensjoner på andre ting som dekkshus, maskinrom, lasterom og tanker er også en del av generalarrangementet.

GA gir en visuell representasjon av skipets planløsning og er et viktig verktøy for å planlegge skipsdesignet og koordinere arbeidet mellom de ulike fagdisiplinene som inngår i designprosessen. GA danner også grunnlaget for beregninger av stabilitet, vekt og styrke. Tegningene er relevante når design skal utveksles med rederi, klasseselskap og andre interessenter.

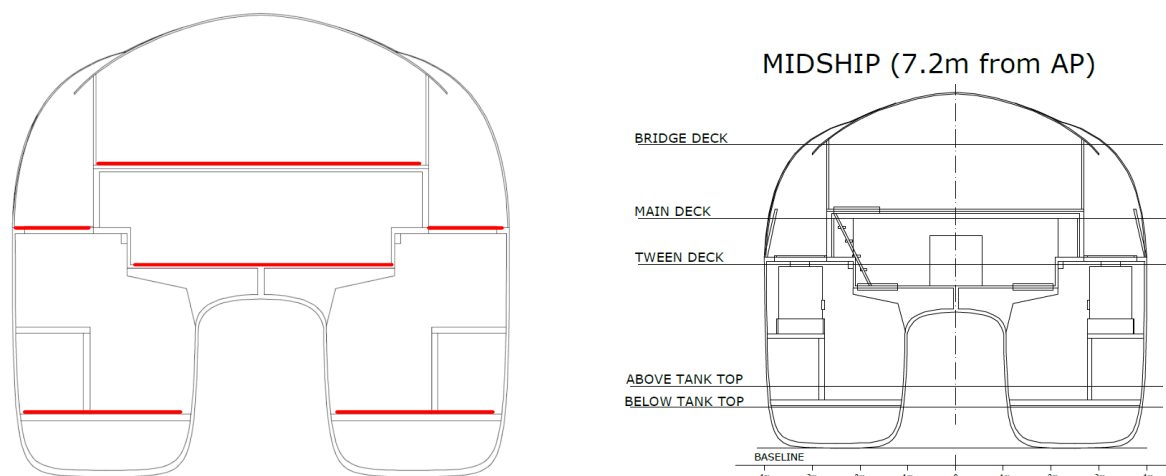
Gjennom designspiralen vil GA stå sentralt og oppdateres ved hver iterasjon. I denne seksjonen presenteres det endelige GA. Generalarrangementet er et resultat av arbeidet som videre presenteres i rapporten. Endelig GA, tankplan og linjetegninger er å finne i Vedlegg F.

9.1 Planløsning og seksjoner

GA skal inneholde tegninger av snitt fra alle dekk, og snitt fra alle tre retningene forfra, overfra, og fra siden. Dette vil i kombinasjon med spantelinjaler plassert rundt snittene kunne vise plasseringen av systemer og komponenter i høyde-, bredde-, og lengde-retning. Dette gjøres typisk med følgende inndelinger:

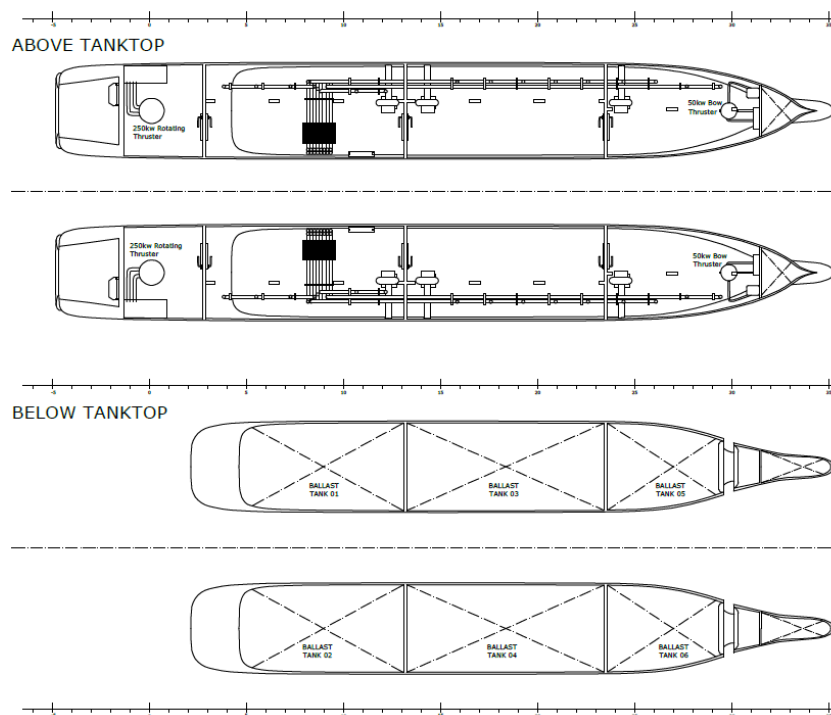
- GA skal inneholde snitt i det horisontale planet som viser planløsning av alle dekk og relevante seksjoner sett overfra.
- Det skal vises minst ett tverrsnitt i det loddrette planet sett fra siden som går gjennom fartøyets senterlinje og eventuelt andre relevante seksjoner.
- Relevante tverrsnitt i det loddrette planet sett forfra eller bakfra skal inkluderes for å illustrere plassering av systemer i bredde-retning.
- Det kan også plasseres inn tegninger av skipets eksteriør sette ovenfra, forfra, bakfra, og fra siden.
- GA skal også vise plassering av fartøyets tanker, og i skip med tradisjonell tanktopp, kan snittet under tanktopp-dekket inkluderes for å få med alle skipets rom og seksjoner helt ned til kjølen.

9.2 GA



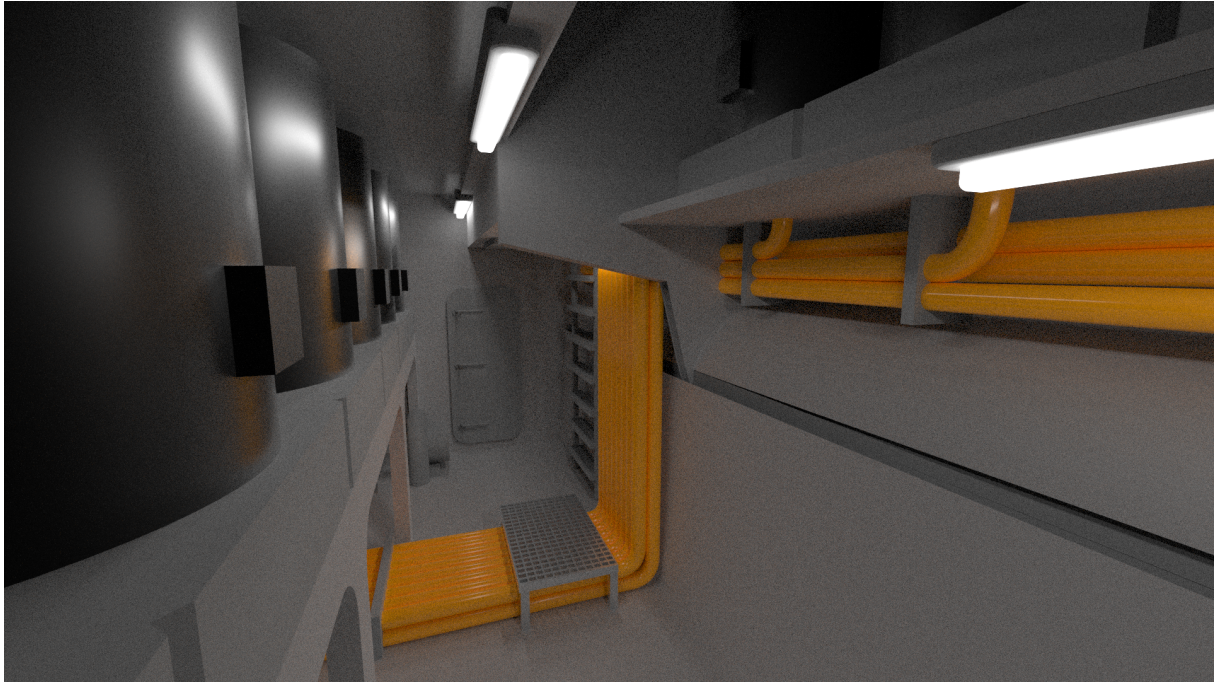
Figur 9.1: Inndeling av dekk.

Dette fartøyets GA vil inneholde snittene i det horisontale planet som viser området under tanktopp, dekket over tanktopp, tweendeck, hoveddekk, og bro. Med fartøyets lille størrelse og spesielle utforming med katamaranskrog er det flere av dekkene som er “halvdekk”. Flere av dekkene er plassert ved siden av hverandre i tillegg til over hverandre. Det er flere flater mellom dekkenes plan som holder relevante systemer som energilagringssenheter. Figur 9.1 viser dekkflatene og hvor hvert snitt av alle dekk i GA er sett fra.



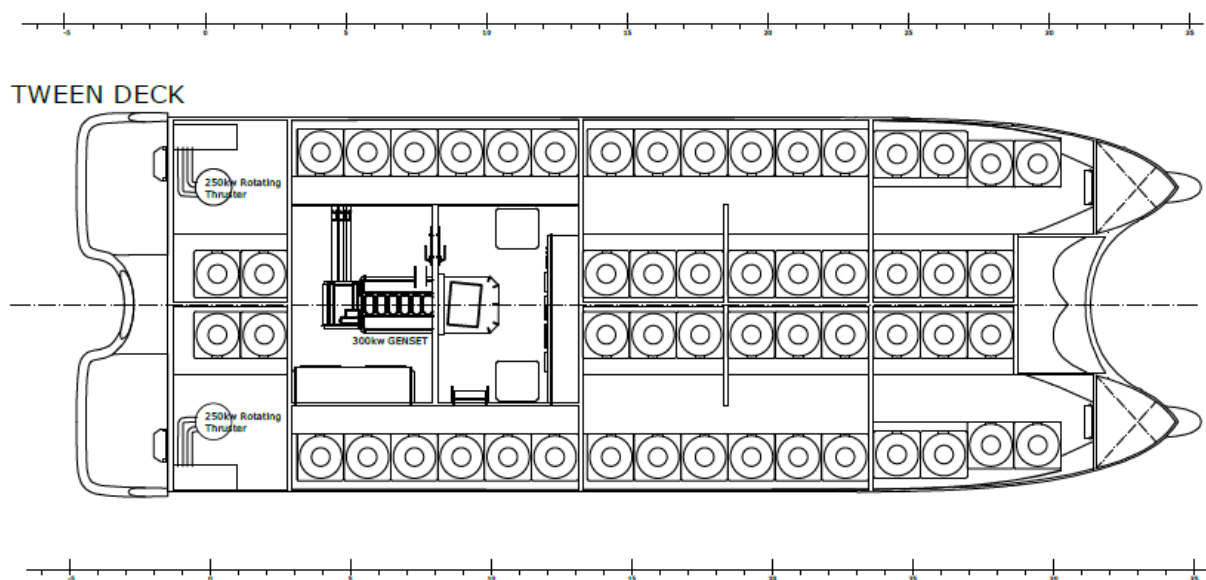
Figur 9.2: GA for dekk under og over tanktopp.

Det laveste av de horisontale snittene viser undersiden av tanktoppen og de vanntette tverrgående skottene som deler området under tanktopp opp i tre seksjoner. Som vist i Figur 9.2 kan disse seksjonene anvendes som ballasttanker om nødvendig.

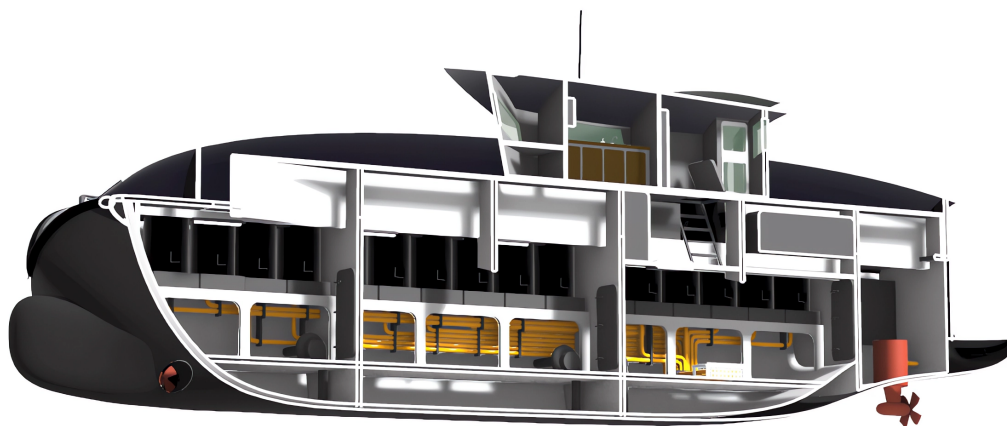


Figur 9.3: Interiør under dekk.

Dekket over tanktoppen inkluderer planet mannskapet vil bevege seg på under dekk i hvert av skrogene. Her vil være plass til kabler, rør, og annet fastmontert utstyr, som vist i Figur 9.3. Bakerst på dette dekket er motorrommene lokalisert i hvert skrog. Det er satt av et relativt stort volum til motorrommet som hovedsaklig skal bare romme de kompakte elektriske hovedmotorene. Det er dermed også plass til kjølesystemer og elektriske kontrollsystemer, eksempelvis transformatorer som gir hovedmotorene korrekt spenning fra energilagringseenhetene.

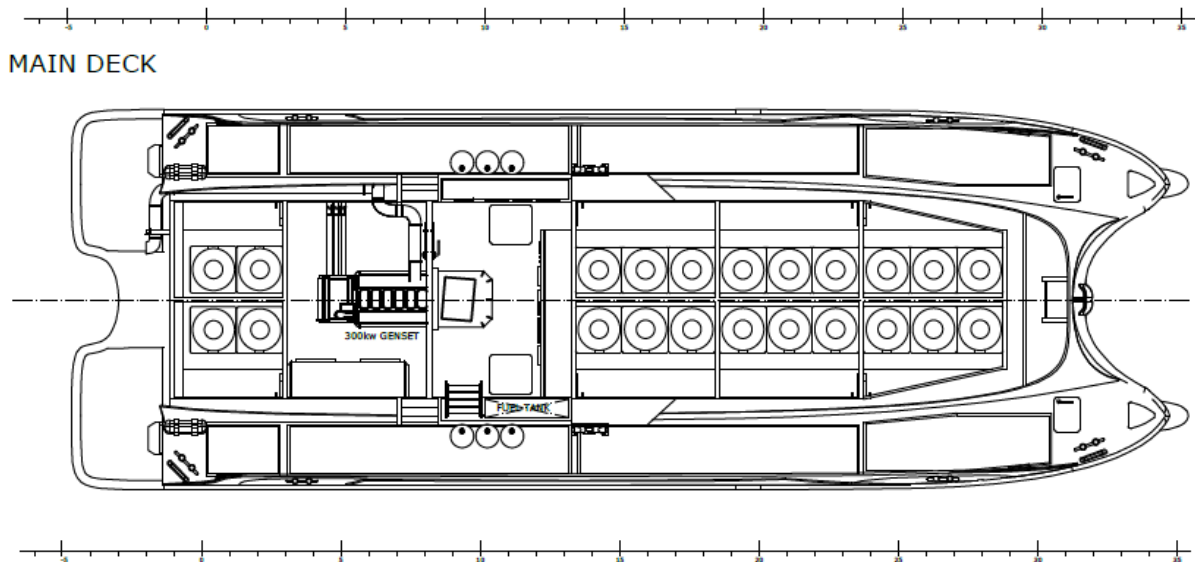


Figur 9.4: GA for tweendeck som viser alle energilagringseenheter og teknisk rom.



Figur 9.5: Langsgående snitt av fartøyets interiør sett fra midtlinjen, som viser ytre rad med svinghjul.

Tweendeck-snittet viser inndelingene som er direkte under hoveddekket. Dette viser lokasjonene til alle energilagringseenhetene og det tekniske rommet som inneholder de elektriske styrings- og distribusjonssystemene, og et maskinrom bak med generator, som vist i Figur 9.5. Dieselgeneratoren er for sekundær strømtilførsel til fremdrift og andre kritiske system ombord. Som vist i Figur 9.4 er motorrommene strukket ut til tweendecket sin høyde.



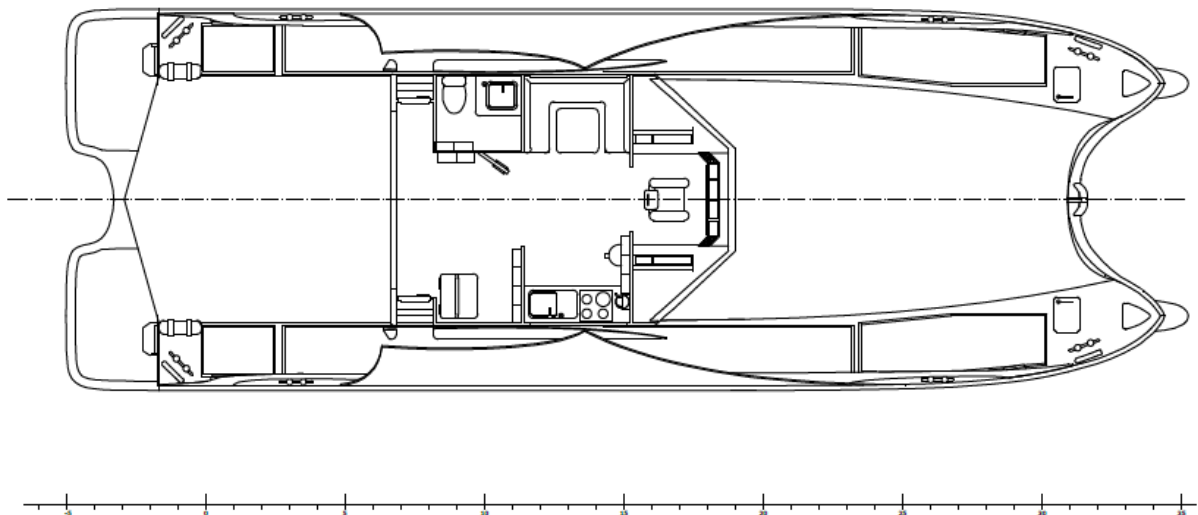
Figur 9.6: GA for hoveddekket.



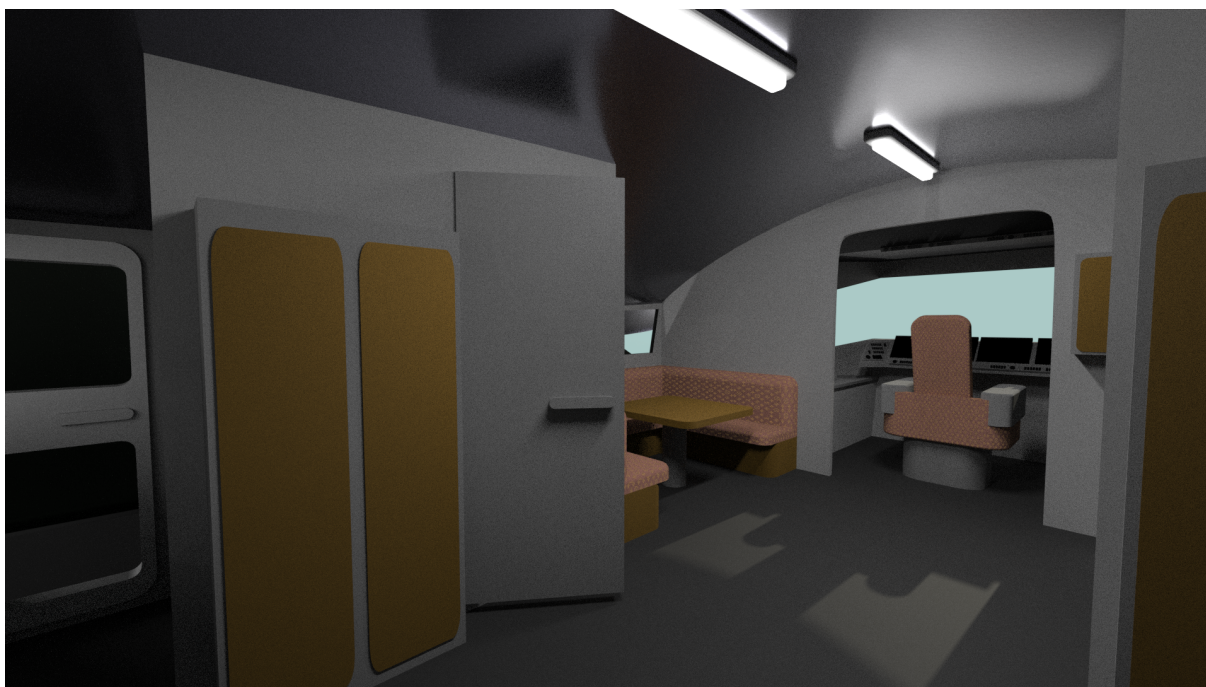
Figur 9.7: Langsgående snitt av fartøyets interiør sett fra yttersiden, som viser indre rad med svinghjul over tunneltaket.

Hoveddekket inkluderer dekkoverflaten til eksteriøret av fartøyet. Figur 9.6 illustrerer dekksutstyr som fortøyningspunkt, forankringssystem, og dekkslukene som gir tilgang til energilagringseenhetene under dekk. Energilagringseenhetene i senter av fartøyet er også synlig her fordi de er plassert på tweendeck-høyde sammen med det tekniske rommet og maskinrommet, som vist i Figur 9.7. I teknisk rom er dieseltanken til generatoren plassert.

BRIDGE DECK



Figur 9.8: GA for brodekket.



Figur 9.9: Interiør styrhus.

På brodekket er det en inngang til styrhuset fra eksteriørdekket på hver side. Det er også her man finner en luke ved siden av inngangen på styrbord side som går ned til teknisk rom, og videre ned i hvert av skrogene. På babord side av styrhuset er et toalett plassert. Siden fartøyet er dimensjonert for korte turer på noen få timer, er behovet for ferskvann og sewage-tank lite nok til å at tanker på rundt 50 liter hver kan få plass i styrhusinteriøret. På denne måten blir det enklere å koble av styrhusmodulen fra skroget uten at rørsystemer må kobles av skrogets nedre del.

I senter av styrhuset er en sittegruppe på babord side, og en kjøkkenbenk på styrbord side. Rommet har mye åpent areal, og god plass til plassering av skap og andre oppbevaringsenheter for lagring av utstyr. Fremst i styrhuset er broen som et eget rom som vist i Figur 9.8 og 9.9. Dette inkluderer en enkel førerposisjon, og vil også være lokasjon for alle datamaskiner relatert til navigasjonsutstyret.

10 Skrogmotstand

Viktige elementer ved designet er skrogets form. Skroget skal gi bæring, fungere som beskyttende struktur og være dynamisk utformet for redusert energibruk. Derfor er det viktig å optimalisere skrogformen. Grundige undersøkelser av slepemotstanden er derfor viktige. Disse testene gir viktig informasjon om skipets fart, energieffektivitet, sjødyktighet, manøvreringsegenskaper og ytelse i ulike sjøkondisjoner. Data fra slike tester kan brukes til å optimalisere skip sine design og sikre at nødvendige kriterier oppfylles.

Problemstilling

I tillegg til å gi en estimering av skrogmotstanden er slepemotstanden god for å avklare hydrodynamiske problemstillinger. I denne oppgaven er det valgt å undersøke om det skal være en bulb på skroget. Med første utkast fra skrogvalget kan skrogformen testes empirisk. Dette gir gode tall til en detaljert runde i designspiralen. I siste runde kan en endelig skrogform testes i slepetanken.

10.1 Empirisk skrogmotstand

I innledende deler av designfasen er empiriske modeller gode for å forutsi skrogets motstand. Empiriske modeller er baserte på store datasett fra fysiske tester. Intensjonen med disse modellene er å omsette skrogets karakteristiske data som deplasement, yte mål, vått areal, Froudetall og lignende til en motstandskurve. Da skrog kan være svært varierte og forskjellige, er det viktig å velge en egnet modell for å få gode tall. Programvare som for eksempel Maxsurf Resistance er svært godt egnet for å beregne motstand empirisk da mange modeller er inkluderte.

Maxsurf Resistance inneholder flere metoder og det er viktig å velge en egnet metode. Som følge av den fyldige katamaranen er det ingen metoder som er direkte egnet. Holtrop & Mennens metode er en relevant metode for deplasement-skip, men er basert på et datasett som inneholder en del større enkeltskrog. Et annet alternativ er Mollands Slender Body metode. Metoden er ment for slanke skrog, både katamaraner og enkle, og tar for seg flere aspekter med slepemotstanden. Stort deplasement og fyldig form er derimot ikke helt i tråd med det underliggende datasettet metoden ble utviklet med. Derfor må det medregnes store usikkerheter ved bruk av disse modellene.

10.1.1 Resultater

Tabell 10.1 viser resultatene fra Maxsurf Resistance med Slender Body Method for begge skrogvariantene. Hastighetene som er hentet ut er i intervallet fartøyet skal utvikles for å operere i. Skrogvirkningsgraden i Maxsurf ble satt til 100 % og øvrige virkningsgrader er ikke med i beregningen. Resultatene viser at den valgte modellen indikerer lavere motstand

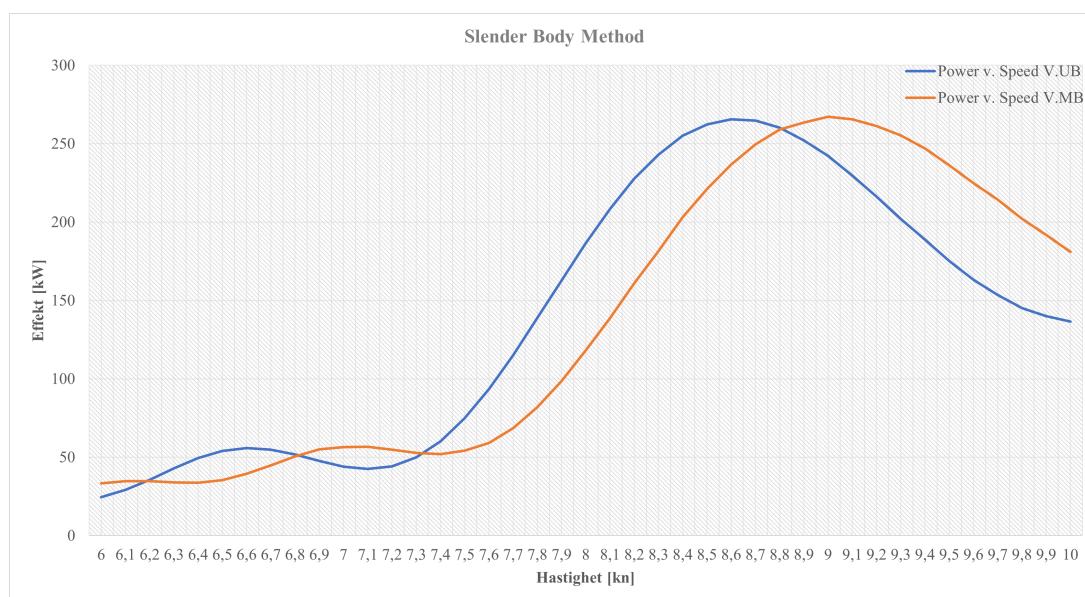
med en bulb. Hastighetene er oppgitt med enhet knop og betegnes med V . Motstanden er målt i Newton som enhet og betegnet som R . Effekten er oppgitt med kW og betegnes med P . Blå indikator vil brukes for versjon uten bulb konsekvent, og oransje for versjonen med.

Det poengteres at effekten som trengs i 9 knop er større enn 10 knop for begge modellene, og at dette bør undersøkes ytterligere i et modellforsøk. Resultatene sammen med antatte virkningsgrader benyttes til å oppdatere driftsprofilen og eventuell endring i antall svinghjul som trengs. All data fra den empiriske analysen er i Vedlegg H.

Tabell 10.1: Resultatene fra Maxsurf Resistance med Slender Body Method.

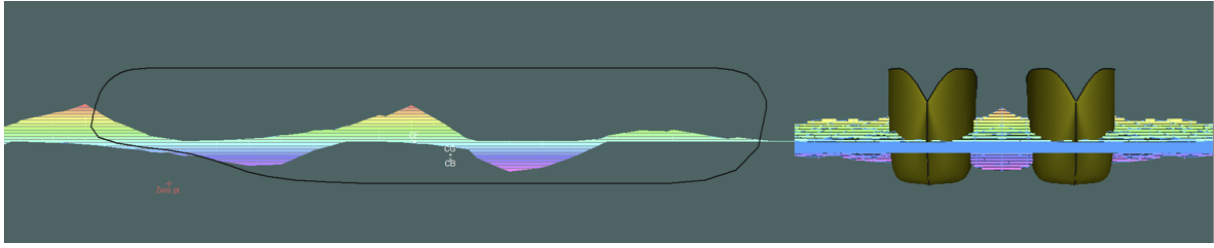
V - [kn]	Uten Bulb		Med Bulb	
	R - [N]	P - [kW]	R - [N]	P - [kW]
4	2 879	6	6 584	14
6	7 969	25	10 798	33
7	12 212	44	15 686	56
8	45 186	186	28 676	118
9	52 312	242	57 717	267
10	26 536	137	35 173	181

I den grafiske fremstillingen i Figur 10.1 er et ytterligere detaljert plot av motstanden framstilt. I hastigheter over syv knop er det tydelig at modellen påvirkes av Froudetall og effekter av bølgedannelsene.



Figur 10.1: Resultatene fra Maxsurf Resistance med Slender Body Method.

En bølgesimulering ble også framstilt fra Maxsurf Resistance som vist i Figur 10.2. Simuleringen er gjort med en hastighet på 8 knop. Fra siden vises det store bølgedannelser inne i tunnelen og hekkformens innvirkning på dette. Forfra indikerer også at bølgedannelsene i tunnelen er mer signifikante enn omgående bølger på utsiden av skroget.



Figur 10.2: Resultatene fra Maxsurf Resistance med bølgeanalyse i 8knop.

10.2 Praktisk Slepeforsøk

Praktiske slepeforsøk for skip utføres for å teste og verifisere skrogs hydrodynamiske ytelse. Metoden er økonomisk rettferdiggjort da gode modellforsøk kan avdekke prosjekters egenskaper i et tidlig stadium. Praktiske slepeforsøk kan også brukes til å verifisere og validere datasimuleringer og andre beregninger som er gjort tidligere i designfasen. I den siste runden av designspiralen er dette en egnet metode for å sikre pålitelige tall.

10.2.1 Metode

Det designes og maskineres to typer skrog som vist i Figur 10.3. Begge skal testes ved flere hastigheter. Intensjonen er å avklare om bulben gir lønnsomme besparelser som de empiriske modellene indikerer. Hvert skrog testes i seks hastigheter hvor hver hastighet innebærer fem slep. Eventuelle slep med bølger kan også gjennomføres.



Figur 10.3: Baug-partiet med og uten bulben som skal testes.

Skrogene freses ut lokalt og er lagd av Sundolitt XPS300 [61]. Skrogene består av fem deler. Det er fire halvsider og et mellomparti over tunnelen. Skalaen er 1:21. Hver enkelt komponent er pusset og behandlet før de limes sammen med en konstruksjonslim. Det er videre lagd brønner ned i hver side som tillater å plassere vekter lavt. En finerplate er også limt på toppen. Platen er laserkuttet og følger hoveddekkets omriss. Platen har også et inngravert koordinat-system som gjør flytting av vekter og montering av lastcellen presist. Utvikling av modellene er vist i Figur 10.4.



Figur 10.4: Produksjonen av modellen fra fres til sammenlimt skrogmodell.

Det er gjort videre detaljeringer av modellen for å tilrettelegge for gode tilleggselementer. Det er skjært ut hull i korrekt skala for baug-thrustere, og satt på podder i akterskipet for å gjenskepe fremdriftssystemet. Disse komponentene skal øke graden av tilleggsmotstander og gjenspeile et mer realistisk testscenario. Tilleggsmotstandene er illustrert i Figur 10.5.



Figur 10.5: Pod-stammer og thruster-tunnel på modellene.

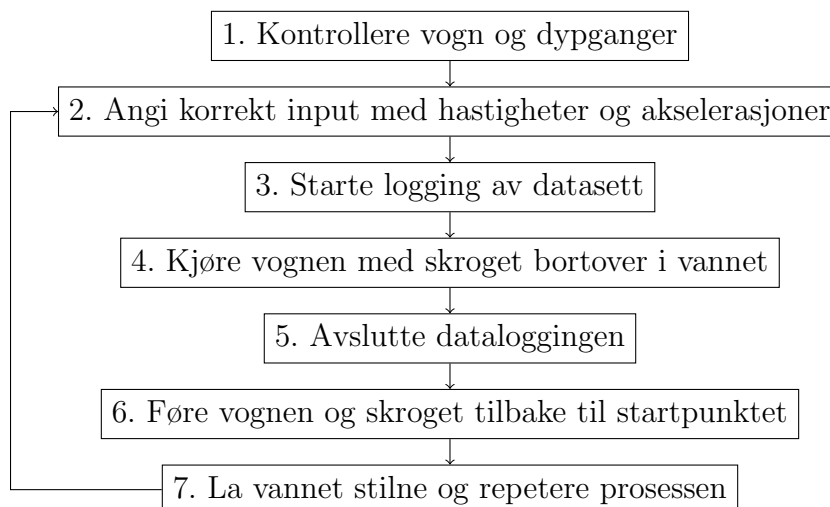
Store striper med antisklitape er også festet ved flere lokasjoner i baug-partiet som vist i Figur 10.6. Årsaken til størrelsen på disse stykkene med ru tape er for å fremprovosere turbulens i vannet enklest mulig. I fullskala vil turbulens oppstå enkelt, men i små skalaforsøk som dette kan det være vanskelig å stimulere turbulens. For å kompensere for dette avviket, forsøkes dette å gjenskapes med denne tapen. Dette for å sikre en så virkelighetskorrekt strømming som mulig.



Figur 10.6: Striper av antisklitape på begge modellene ved baugen.

Testingen utføres i slepetanken lokalt ved NTNU Campus Ålesund. Forsøket utføres etter ITTCs prosedyre 7.5-02-02-01, Vedlegg G [62]. I forkant av forsøkene kalibreres lastcellen og utstyr kontrolleres for sikkert bruk. Deretter utføres testing for hvert skrog separat i

stille vann. En praktisk beskrivelse av testprosedyren er beskrevet mer detaljert i Figur 10.7.



Figur 10.7: Praktisk beskrivelse av slepeprosedyren.

All data som samles inn fra testingen skal videre omregnes til fullskala. Kontroll av verdier og nøyaktighet er essensielt for å sikre presisjonen når rådata fra slepetanken skal prosesseres. Det samles inn fem målinger for hver hastighet og et gjennomsnitt av målte verdier skal benyttes til videre beregninger. Videre brukes ITTCs metoder for å oppskalere tall til fullskala [62]. Excel vil brukes som verktøy for å prosessere dataen fra slepeforsøket. Da skal rådataen omdannes til en koeffisient for modellens totale motstand og deretter reduseres for friksjon. Den resterende motstanden videreføres. Denne legges sammen med koeffisienter fra ITTCs modeller. Avslutningsvis summeres disse sammen til en total motstandskoeffisient til skipet i fullskala, og en total motstand i fullskala kan beregnes.

10.2.2 Resultater

Den første testen ble gjennomført med modellen uten bulb. Det ble gjennomført tester i hastigheter fra 4 til 12 knop hvor data ble innhentet i intervallet 4 til 10 knop. Tabell 10.2 viser den totale motstandskoeffisienten til skipet i fullskala. Koeffisienten er videre brukt til å beregne skrogets totale motstand i tilhørende hastigheter og effekten dette tilsvarer. Siste kolonne er effekten med en tillagt margin på 15 % som benyttes til videre beregninger.

Tabell 10.2: Testresultater fra slepetank for modell uten bulb.

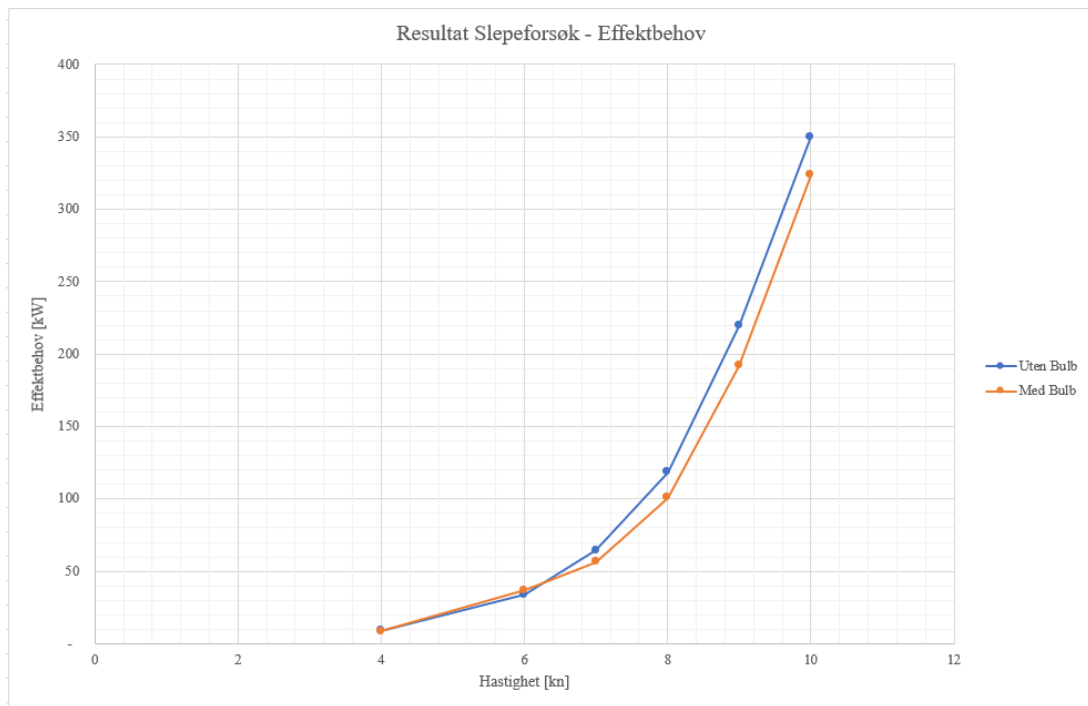
Uten Bulb				
Vs [kn]	Cts [-]	Rts [N]	P [kW]	P +15% [kW]
4	8,74E-03	3 811	8	9
6	9,70E-03	9 518	29	34
7	1,16E-02	15 543	56	64
8	1,43E-02	25 011	103	118
9	1,87E-02	41 247	191	220
10	2,17E-02	59 184	304	350

Tilsvarende prosedyre ble utført for modellen med bulb. Tabell 10.3 viser resultatene fra forsøket. Totalmotstandskoeffisienten er benyttet for å finne motstanden og effekten som kreves i gitt hastighet. Disse resultatene er også tillagt en margin på 15 %.

Tabell 10.3: Testresultater fra slepetank for modell med bulb.

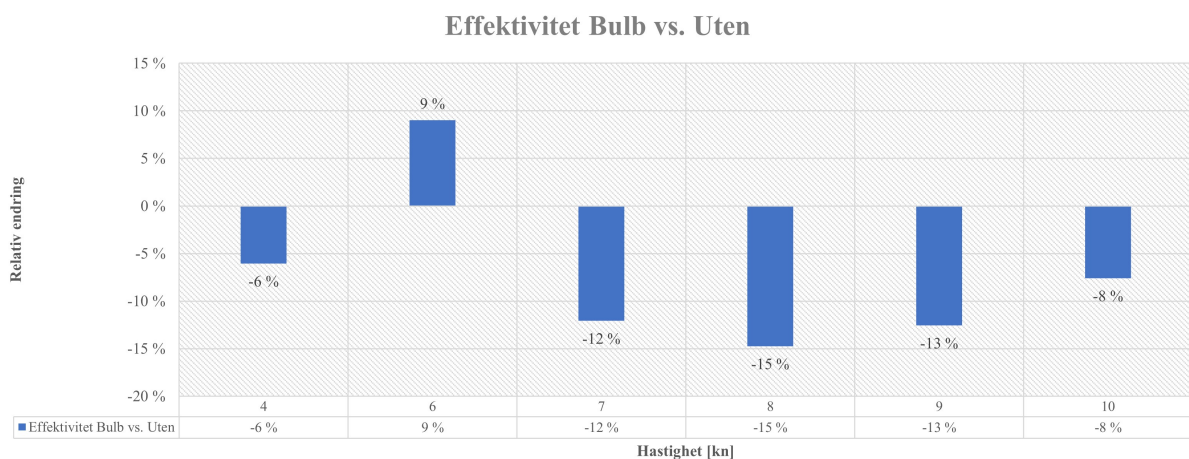
Med Bulb				
Vs [kn]	Cts [-]	Rts [N]	P [kW]	P +15% [kW]
4	8,18E-03	3 581	7	8
6	1,05E-02	10 378	32	37
7	1,02E-02	13 668	49	57
8	1,22E-02	21 326	88	101
9	1,63E-02	36 069	167	192
10	2,00E-02	54 694	281	324

Figur 10.8 viser effektbehovet fra begge testene omregnet til fullskala. Effektkurvene er lagt i samme plott og viser at det er forskjell i testresultatene. Blå kurve tilhører modell uten bulb, oransje er for modellen med bulb. I lave hastigheter er avvikene små, men i høyere hastigheter fremkommer det at bulben reduserer motstanden og derfor medfører et lavere effektbehov i disse hastighetene. Unntaket er 6 knop hvor bulben opplever mer motstand.



Figur 10.8: Testresultater fra slepeforsøk omregnet til fullskala for begge skrog.

Relativ differanse mellom de to skrogene er fremstilt i Figur 10.9. Figuren indikerer at bulben gir besparelser inntil 15 % på det meste. Testingen i 6 knop ga også tydelig en økning i mostand med bulben på 9 %. I de større hastighetene er det funnet besparelser på over 10 %. Testresultatene indikerer at bulben kan gi besparelser og at hastigheten i intervallet 7 til 10 knop er optimalt.



Figur 10.9: Skrogenes relative forskjell i effektbehov.

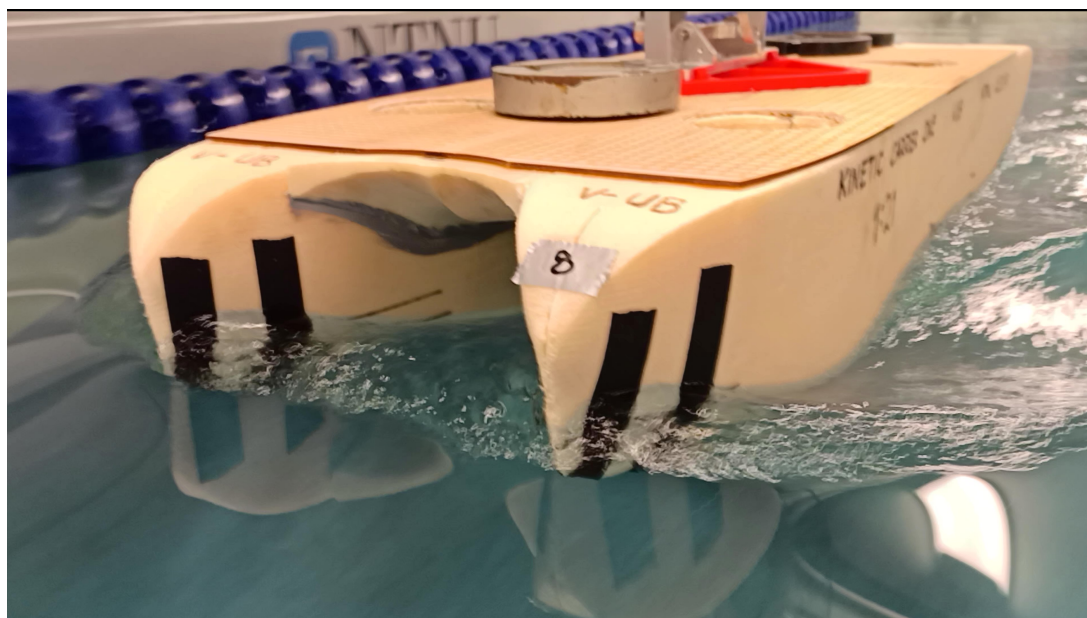
Det ble også innhentet visuell dokumentasjon fra tanktestingen. Bildene viser visuelt hvordan strømmingen rundt baugen forekom, og er hjelpsomme for å vurdere resultater. Figur 10.10 viser baugen til begge modellene i 8 knop. Over bildet er det lagt en rød linje som

viser baug-bølgen som oppstod under slepet. Her fremkommer det at bulben generer en baugbølge lengre fram. Strømningen rundt baugen på skroget med bulb fremstår også mindre turbulent. Det ble også observert på modell uten bulb at de to separate skrogelementene til katamaranen dannet en felles baugbølge istedenfor to separate.



Figur 10.10: En visuell sammenlikning av modellene i 8 knops slep. En rød linje som indikerer baugbølgen er lagt over.

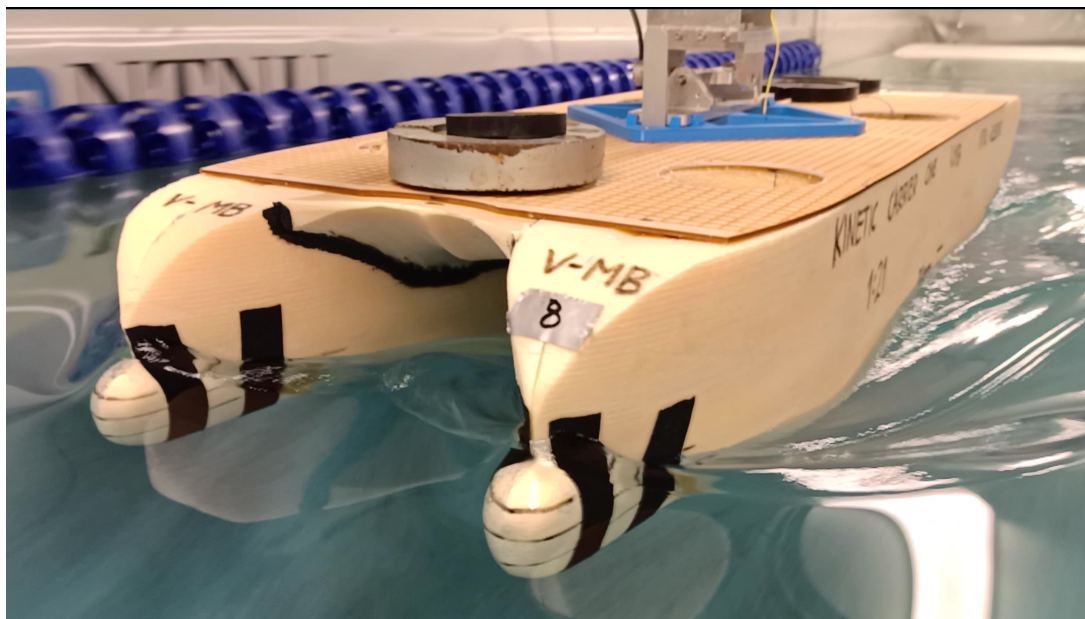
Tilsvarende bilder av hele skroget viser strømningen rundt hele modellen fra testen i 8 knop fullskala. Versjonen uten bulb er illustrert i Figur 10.11. Her vises det tydelig at baugbølgene er kombinert sammen til en større bølge som skaper stort trykk foran skroget og større bølgedannelser lengre bak.



Figur 10.11: Bilde fra testing i 8 knop for versjonen uten bulb.

For versjonen med bulb ble bølgemønsteret svært annerledes og fremstod mye ryddigere. Resultatet er illustrert i Figur 10.12. Her fremstår strømningen mindre kaotisk og

bølgeformen langs skrogsiden virker lengre og har en lavere bølgehøyde. Mellom skrogene dannes også et møtepunkt mellom de to bulb-formene som kommer fra hver sin baugbølge.



Figur 10.12: Bilde fra testing i 8 knop for versjonen med bulb.

Alle beregninger og samlet data fra slepeforsøket er vedlagt i Vedlegg H.

10.2.3 Feilkilder

Usikkerhet med lastcellen kan ha medført feil i resultatene. Det ble også observert en endring i vekt igjennom forsøkene som kan være et resultat av vann i modellen. Overordnede effekter med tankens form og størrelse kan også ha hatt innvirkning på resultatene. Dette kan komme av blockage-effekter.

10.3 Konklusjon Skrogmotstand

Det konkluderes med at bulben skal bevares til det endelige designet. Optimal marsjfart bør være 8 knop, som er lavere enn først antatt. Resultatene fra testing indikerer at dette er den optimale hastigheten for skrogets hydrodynamiske egenskaper. Bulbens effekt er også størst i denne hastigheten, hvor en besparelse i effekt ble målt til 15 %. Forventet effekt ut av energilageret blir da 172 kilowatt i 8 knop med antatte virkningsgrader og sikkerhetsmarginer. Resultatene videreføres til en oppdatert driftsprofil.

11 Vektsberegninger

Et fartøy sin totale vekt vil direkte påvirke volumdeplasementet til skroget. Dette vil videre bestemme skrogets dypgang. Videre vil dette påvirke fartøyets stabilitet avhengig av skrogform, og slepemotstand som dikterer fartøyets energiforbruk, hastighet, og rekkevidde. Det er mange sentrale verdier og data som blir direkte diktert av et fartøy sin vekt. Derfor er vektberegninger en stor del av en skipsdesign-prosess som gjentas regelmessig, ettersom endringer vil påvirke mange aspekter av et skip [63].

11.1 Metode

Hvordan vekten er fordelt over et skips lengde vil også påvirke skipets krav til langskipsstivhet. Mye vekt i baugen og akterenden, men lite vekt på midtskipet, eller motsatt, vil skape et bøyemoment om midtskipet som vil kreve et minimum motstandsmoment. Disse kondisjonene kalles hogging og sagging. Strategisk vektfordeling langs skipets lengde kan brukes til å trimme skroget til en satt dypgang ved AP og FP. I et skip med variasjoner i vekt som et lasteskip, vil det ha nytte av ballasttanker som kan fylles med sjøvann for å manuelt kontrollere vektfordelingen i skroget.

Avhengig av hvor ballasttanker er plassert, kan de brukes til å endre trim, dypgang, og stabilitet av fartøyet, eller en kombinasjon av flere egenskaper. En ballasttank plassert langt fra skipets LCB, vil gi en større momentarm til endring av trim med et mindre volum. En tank plassert i LCG vil i hovedsak øke dypgang, og påvirke stabilitet avhengig av tankens VCG.

De fleste skip vil ha flere typer lastkondisjoner med varierende vekt, dypgang, stabilitet, og vektfordeling. For skip med forbrenningsmotorer vil vekten av drivstoff være et aspekt i lastkondisjonene, og for skip designet for å bære last vil det ha forskjellige kondisjoner avhengig av hvor mye last det bærer [64].

11.2 Resultat

Dette fartøyet har veldig unik karakteristikk. Det defineres som et lasteskip, men lasten i form av energi har ingen egenvekt. Skipets dødvekt vil da være den samme uansett om det er fulladet eller tomt. Den eneste variasjonen i vekt i vanlig operasjon kan være drivstofftanken til nødgeneratoren, men denne vil ha et relativt lite volum. Dessuten vil det være standard operasjonsprosedyre at denne bare brukes under nødsituasjoner eller ved uventede energibrudd. Derfor antas det at denne alltid vil være full.

Skipet vil i ordinær drift ha kun én lastekondisjon. Alle energilagringseenhetene defineres som en del av skipet lettvekt, og ikke dødvekt som med andre lasteskip. Det vil være tilgjengelig 53,12 kubikkmeter i dobbeltbunnen som kan brukes til ballast. Det er derimot lite behov for disse med den ordinære lastekondisjonen. Tankene defineres som voids.

11.2.1 Skrogvekt

Tabell 11.1: Estimert vekt av skrog og overbygg.

Item	Weight [t]	LCG [m]	Aft lmt.	Fwd lmt.	VCG [m]	Vert bottom lmt.	Vert top lmt.	TCG [m]	Trans left lmt.	Trans right lmt.	LMOM [tm]	VMOM [tm]	TMOM [tm]
Hull	30.230	9.99			3.00			0.00			302.00	90.69	0.00
Superstructure	6.489	7.90	4.20	11.60	5.75	4.00	7.50	0.00	-4.00	4.00	51.26	37.31	0.00
Front shell	0.83	14.65			5.15			0.00			12.16	4.27	0.00
Rear shell	0.61	1.23			5.20			0.00			0.75	3.17	0.00
PS shell	0.42	7.00			5.76			-3.06			2.94	2.42	-1.29
SB shell	0.42	7.00			5.76			3.06			2.94	2.42	1.29

Skogets vekt i Tabell 11.1 er estimert fra vektdata i Nauticus Hull og 3D-beam med aluminium 5086 som skrogmaterial. Dette inkluderer all platestruktur, stivere, bærere, og tverrgående skott. Overbyggets vekt vil bestå av flere komponenter i forskjellige materialer som aluminium og komposittmaterialer. Estimert er basert på vekten av skallene laget i sandwichkonstruksjon av glassfiber med masstetthet på 2 tonn per kubikkmeter, og PU-skum med masstetthet på 0,04 tonn per kubikkmeter [65]. Resten av overbygget blir i aluminium, sammen med andre materialer som glass til vindu.

11.2.2 Vekt av energilager

Tabell 11.2: Estimert vekt av energilager.

Item	Weight [t]	LCG [m]	Aft lmt.	Fwd lmt.	VCG [m]	Vert bottom lmt.	Vert top lmt.	TCG [m]	Trans left lmt.	Trans right lmt.	LMOM [tm]	VMOM [tm]	TMOM [tm]
Energy Storage PS 1 (6 units)	7.20	4.88	1.85	7.90	3.15	2.40	3.90	-3.25	-3.75	-2.75	35.10	22.68	-23.40
Energy Storage PS 2 (6 units)	7.20	11.00	8.00	14.00	3.15	2.40	3.90	-3.25	-3.75	-2.75	79.20	22.68	-23.40
Energy Storage PS 3 (4 units)	4.80	16.10	14.10	18.10	3.15	2.40	3.90	-3.25	-3.75	-2.75	77.28	15.12	-15.60
Energy Storage SB 1 (6 units)	7.20	4.88	1.85	7.90	3.15	2.40	3.90	3.25	2.75	3.75	35.10	22.68	23.40
Energy Storage SB 2 (6 units)	7.20	11.00	8.00	14.00	3.15	2.40	3.90	3.25	2.75	3.75	79.20	22.68	23.40
Energy Storage SB 3 (4 units)	4.80	16.10	14.10	18.10	3.15	2.40	3.90	3.25	2.75	3.75	77.28	15.12	15.60
Energy Storage PS C Front (9 units)	10.80	12.63	8.00	17.25	4.15	3.40	4.90	-0.65	-1.15	-0.15	136.35	44.82	-7.02
Energy Storage SB C Front (9 units)	10.80	12.63	8.00	17.25	4.15	3.40	4.90	0.65	0.15	1.15	136.35	44.82	7.02
Energy Storage PS C Rear (2 units)	2.40	0.63	-0.40	1.65	4.15	3.40	4.90	-0.65	-1.15	-0.15	1.50	9.96	-1.56
Energy Storage SB C Rear (2 units)	2.40	0.63	-0.40	1.65	4.15	3.40	4.90	0.65	0.15	1.15	1.50	9.96	1.56
Foundation ES PS	1.49	9.95	1.70	18.20	2.35	2.30	2.40	-3.30	-3.90	-2.70	14.78	3.49	-4.90
Foundation ES SB	1.49	9.95	1.70	18.20	2.35	2.30	2.40	3.30	2.70	3.90	14.78	3.49	4.90
Foundation ES C Rear	0.36	2.00	-0.80	4.80	3.35	3.30	3.40	0.00	-1.50	1.50	0.72	1.21	0.00
Foundation ES C Front	0.84	12.55	7.90	17.20	3.35	3.30	3.40	0.00	-1.50	1.50	10.50	2.80	0.00

Den oppgitte vekten til hver modul med svinghjul-energilagringsenhet fra Spinnig Energy er 1,2 tonn. Dette gir vektfordeling vist i Tabell 11.2. Fundamentet som holder svinghjulene er laget i aluminium med masstetthet på 2,66 tonn per kubikkmeter.

11.2.3 Signifikante vektorer

Tabell 11.3: Estimert vekt av signifikante vektorer.

Item	Weight [t]	LCG [m]	Aft lmt.	Fwd lmt.	VCG [m]	Vert bottom lmt.	Vert top lmt.	TCG [m]	Trans left lmt.	Trans right lmt.	LMOM [tm]	VMOM [tm]	TMOM [tm]
Azimuth thruster PS	3.40	0.10	-0.30	0.50	1.10	0.10	2.10	-2.50	-2.00	-3.00	0.34	3.74	-8.50
Azimuth thruster SB	3.40	0.10	-0.30	0.50	1.10	0.10	2.10	2.50	3.00	2.00	0.34	3.74	8.50
Bow thruster PS	0.70	18.00	17.70	18.30	0.95	0.30	1.60	2.50	2.25	2.75	12.60	0.67	1.75
Bow thruster SB	0.70	18.00	17.70	18.30	0.95	0.30	1.60	-2.50	-2.75	-2.25	12.60	0.67	-1.75
Bridge Equipment and interior	1.50	8.30	5.20	11.40	5.95	5.00	6.90	0.00	-3.00	3.00	12.45	8.93	0.00
Anchor	0.20	18.90	18.70	19.10	4.30	4.00	4.60	0.00	-0.35	0.35	3.78	0.86	0.00
Windlass	0.30	18.45	18.10	18.80	4.38	4.00	4.75	0.00	-0.50	0.50	5.54	1.31	0.00
Anchor chain	0.20	17.90	17.40	18.40	3.60	3.40	3.80	0.00	-0.70	0.70	3.58	0.72	0.00
Generator	1.20	3.58	2.40	4.75	3.95	3.40	4.50	0.00	-0.55	0.55	4.29	4.74	0.00
Emergency raft	0.08	-0.35	-0.80	0.10	4.35	4.05	4.65	0.00	0.00	0.00	-0.03	0.35	0.00
24V Batteries	0.10	7.45	7.00	7.90	3.55	3.40	3.70	-0.70	-0.85	-0.55	0.75	0.36	-0.07
Energy storage cables C (168m)	0.89	8.48	-0.30	17.25	3.20	3.00	3.40	0.00	-1.15	1.15	7.55	2.85	0.00
Energy storage cables PS (140m)	0.74	10.00	1.00	19.00	2.20	2.00	2.40	-3.25	-3.75	-2.75	7.42	1.63	-2.41
Energy storage cables SB (140m)	0.74	10.00	1.00	19.00	2.20	2.00	2.40	3.25	2.75	3.75	7.42	1.63	2.41
Charger systems	2.00	6.35	4.85	7.85	4.15	3.40	4.90	0.00	-3.00	3.00	12.70	8.30	0.00
Emergency diesel fuel tank	0.50	6.95	6.05	7.85	3.45	3.00	3.90	2.35	2.15	2.55	3.48	1.73	1.18

Vektene på komponenter og systemer plassert rundt om i fartøyet er basert på reelle komponenter som kan leveres til et slik fartøy. Verdien på vektene i Tabell 11.3 er videre rundet opp for å tillate en feilmargen. Den eneste av vektene som kan variere under operasjon er drivstofftanken “Emergency diesel fuel tank”, som er plassert på styrbord side av teknisk rom med en dødvekt på rundt 0,5 tonn når full.

11.2.4 Fast ballast

Tabell 11.4: Estimert vekt av ballast.

Item	Weight [t]	LCG [m]	Aft lmt.	Fwd lmt.	VCG [m]	Vert bottom lmt.	Vert top lmt.	TCG [m]	Trans left lmt.	Trans right lmt.	LMOM [tm]	VMOM [tm]	TMOM [tm]
Fixed Ballast PS Bow	3.40	19.67			1.06			-2.50			66.89	3.60	-8.50
Fixed Ballast SB Bow	3.40	19.67			1.06			2.50			66.89	3.60	8.50

For at fartøyet skal kunne ligge på even keel, altså samme dypgang i AP som FP, brukes det fast ballast i baugen av skrogenemed vektorer presentert i Tabell 11.4. Dette blir i form av betong foran kollisjonsskottet i bunnen av baugen.

Tabell 11.5: Estimert total vekt av fartøy.

	LW [t]	LCG [m]	VCG [m]	TCG [m]
Total	131.421	9.894	3.281	0.008

De komplette vektfordelings-tallene er presentert i Tabell 11.5 med total lettvekt, LCG, VCG, og TCG. Dødvekten består kun av drivstofftanken til nødgenerator. I praksis vil ballasttankene ikke brukes til ordinær drift, og forblir definert som void volum. Om behov kan disse redefineres som ballasttanker i senere tid. Regnearket er vist i sin helhet i Vedlegg I.

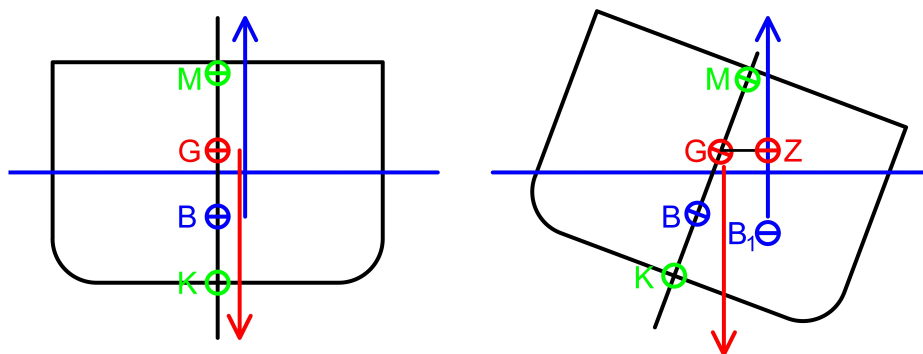
12 Stabilitet og sikkerhet

Et fartøys stabilitet tilsier hvordan det holder seg selv rettet opp flytende i vannet ved likevekt. For at et skip skal kunne operere sikkert i forskjellige sjøkonisjoner må det kunne rette seg opp når det møter eksterne krefter fra bølger og vind. Et skip må kunne holde seg stabilt opprettet for å kunne sikkert driftes. Dermed stilles det detaljerte krav til stabiliteten av et fartøy avhengig av dets funksjon, størrelse, og fartsområde.

Et skip flyter på Arkimedes' prinsipp, og vil ha et oppdriftsenter og et tyngdesenter [66]. Oppdriftsenteret er plassert i senteret av volumet til skroget som er neddykket under vann. Når et typisk skrog krenger vil oppdriftsenteret forflytte seg. Tyngdesenteret til et skip med fast last vil som regel være lokalisert på et fast punkt. Tyngdesenteret vil i et stabilt skrog krenge til likevekt direkte over oppdriftsenteret, og fungere som to krefter mot hverandre med lik størrelse. Når disse er plassert over hverandre vil kreftene være i likevekt og skipet vil ligge stille uten krengeing eller annen bevegelse [67].

DNV sine regelverk for stabilitet og sikkerhet blir brukt som standard, men i enkelte tilfeller vil DNV referere videre til andre regelverk som skal følges. I stabilitet er det GM-verdi og GZ-kurve som er sentrale verdier. Av sikkerhetsutstyr er det mye som ikke blir obligatorisk for et fartøy under 24 meter LOA og bruttotonnasje under 500. Systemer som brannslukkingssystem og nødlensesystem kan neglisjeres i følge regelverkene, men i praksis er det stor fordel å inkludere slikt sikkerhetsutstyr som er relativt billig.

12.1 Metode



Figur 12.1: Illustrasjon av signifikante punkter og krefter i stabilitet [67].

Generelt brukes et sett med symboler for å beskrive de forskjellige punktene og kreftene som vist i Figur 12.1.

- M = Metsenteret
- G = Vertikalt tyngdepunkt, VCG.
- B = Oppdriftsenter
- K = Kjøl til skipet definert som laveste punkt, gjerne i baseline på midtskipet i GA.

- B_1 = Forskjøvet oppdriftsenter ved krengeving
- Z = Avstand mellom G og vertikale linjen som går mellom M og B_1 .

Avstanden mellom G og M kan også kalles GM-verdi, og er et sentralt mål i hvor stabilt et fartøy er. En høy GM-verdi vil bety at skroget har et stort rettende moment i små krengevinger og gir en stiv båt. En lav GM vil gi et mindre rettende moment som tillater mer rulling og mykere stabilitet. Avstanden mellom G og Z er momentarmen til det rettende momentet i større krengevinger. GZ endrer seg med krengevinger. Om GZ blir 0 på et punkt vil fartøyet ikke lenger kunne rette seg opp igjen, da det mister sitt rettende moment. Da kantrer skipet [67].

En katamaran har en naturlig høy formstabilitet på grunn av sin store totale bredde og hvordan B_1 forflyttes under krengeving med stort utslag. I utregning av en katamaran sin GM må det brukes et ekstra ledd i andre arealmomentet kalt Steiners sats, som vist i Formel 12.1. Dette resulterer i en mye høyere GM-verdi enn for monoskrog av samme størrelse [68].

$$I_s = A \cdot r^2 \quad (12.1)$$

Hvor I_s er tillegget i annet arealmoment, A er vannlinjearealet og r er avstanden fra skipets senterlinje til arealsenteret [68].

For å gjøre utregningene av skipets stabilitet blir Maxsurf Stability Advanced brukt for effektiv prosessering av stabilitetstall, sammen med automatisk kontroll opp mot klassekravene. Programmets utregninger er basert på skrogets geometri og alle vekter oppgitt som skrogets egenvekt, komponenter, og tanker plassert rundt om i fartøyet. Tallene er videreført fra vekstberegningene.

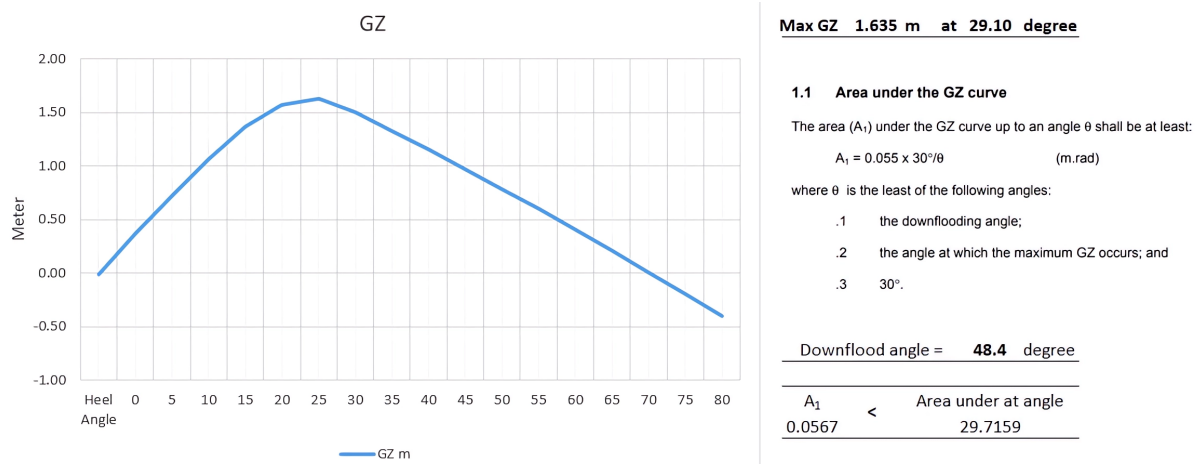
12.2 Resultat

Regelverket som brukes for dette fartøyet er RU-HSLC (High Speed Light Craft), som er mest relevant for de fleste typer fartøy under 24 meter LOA. De generelle reglene for stabilitet i skip (DNV-RU-SHIP Pt.3 Ch.15) er ikke gjeldende for fartøy under 24m LOA, og i stabilitet for HSLC (DNV-RU-HSLC Pt.3 Ch.6) blir krav til intakt stabilitet referert videre til HSC 2000 Annex 7 for multihull. Stabilitetsrapporten ligger i Vedlegg I.

12.2.1 Stabilitet ved små vinkler

Etter regelverket HSC 2000 er det ikke satt krav til minimum GM for fartøy under 24 meter LOA og 500 bruttotonn. Katamaraner har naturlig høy GM, og for et fartøy som ikke skal frakte passasjerer, er det få krav å ta hensyn til. Skipets totale GM ligger på 4,4 meter i designkondisjonen.

12.2.2 Stabilitet ved store vinkler

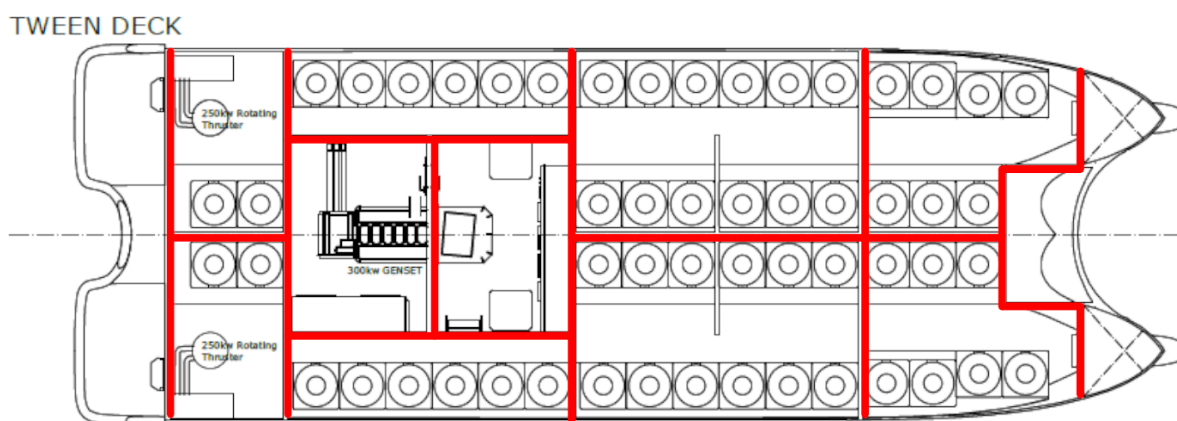


Figur 12.2: GZ-kurve og krav til areal under kurve.

Kravet til GZ-verdier er hentet fra HSC 2000 Annex 7. Dette er det intakte stabilitetskravet DNV referer til for katamaraner under 24 meter LOA i DNV-RU-HSLC Pt.3 Ch.6. I Figur 12.2 er GZ-kurven og relaterte verdier til kravene presentert. Max GZ skal etter kravet skje etter 10° krengeing [69].

Skipets GZ-kurve holder krav til max GZ ved minimum krengevinkel på 10°. Max GZ inntreffer også før potensielt downflood point, som defineres som dekkslukene til energilagringsenhetene. Disse lukene er definert som “Service Hatchways”, og vil alltid holdes fastmontert vanntett.

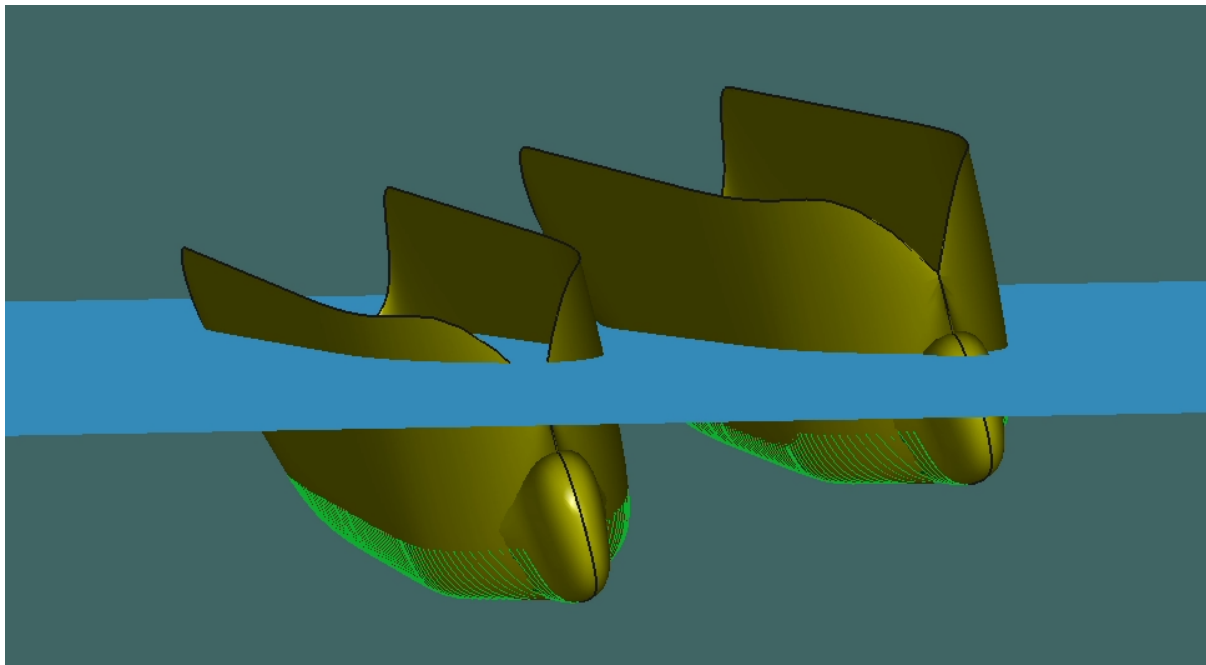
12.2.3 Vanntette seksjoner



Figur 12.3: Vanntette seksjoner i skroget sett i Tween deck høyde.

For saktegående fartøy under 24 meter LOA og uten passasjerer, er det ingen krav til skadestabilitet [69]. Dermed er det ikke nødvendig å designe fartøyet for skadestabilitet,

men skrogets inndelinger er likevel delt inn i flere vanntette seksjoner. Dette oppfyller god skadestabilitet. Som vist i Figur 12.3 har skipet flere tverrgående skott, som sammen med et langsgående skott på midtlinjen deler det nedre skroget inn i 8 vanntette rom i tillegg til teknisk rom under styrhuset. Disse skottene tjener hovedsakelig et formål i skipets styrke mot globale tverrgående moment, men har også som funksjon å dele inn skipet.



Figur 12.4: Skadestabilitet simulering i Maxsurf Stability Advanced.

Det er gjort en skadestabilitetsjekk hvor det ble simulert en punktering i alle inndelinger under tanktoppen på styrbord side, i tillegg til å fylle 60 % av volumet til midtskipet i styrbord skrog. Selv i et så ekstremt skadetilfelle illustrert i Figur 12.4, er GM lik 3,06 meter. Max GZ på 0,78 meter inntreffer ved $36,8^\circ$ krenging til styrbord, og 2,08 meter ved $32,3^\circ$ krenging til babord. Dette bekrefter at de vanntette sonene øker skipets sikkerhet ved eventuelle skader på skroget.

12.3 Sikkerhetsutstyr

Et fartøy trenger tilstrekkelig med nødutganger rundt risikable områder [70]. Skipet har etter definisjonen tre motorrom, hvor generatorrommet under styrhuset som huser dieselgeneratoren er en av de. Teknisk rom er plassert foran generatorrommet, og vegg mellom er definert som vanntett og brannsikret. Teknisk rom vil inneholde drivstofftanken til generatoren og majoriteten av elektriske distribusjon- og kontrollsystemer. Tilgang inn og ut fra energilagrene under hoveddekket gjøres via teknisk rom, og derfor må dette rommet behandles som et risikabelt område som ikke kan entres under en potensiell brann. Om et mannskapsmedlem skulle være på feil side av en potensiell brann i teknisk rom må vedkommende ha en annen nødutgang. Derfor er det plassert en nødutgangsluke i hver baug rett over baugthrusterene. Denne luken går rett opp på hoveddekk med en stige.

Av brannsikkerhet foreslås følgende arrangement. Et gassapparat i generatorrommet som kan manuelt utløses fra broen i en eventuell brann relatert til dieselgeneratoren eller drivstoffsystemet. Med høyspentelektriske system ombord er elektrisk brann en potensiell risiko. Dermed bør også rommene i nedre skrog som huser alle energilagringssystemer og kabelsystem ha et dedikert slukkeranlegg som er kompatibelt med elektrisk brann på båt. CO_2 slukkingsanlegg er ideelt for elektriske branner og er et allsidig slukkemiddel som er skånsomt mot utstyr og omgivelser, men kan være farlig å anvende, og bør dermed utløses fjernstyrt når alle mennesker er ute av rommet [71].

I en eventuell evakuering kreves det enkel tilgang til et evakueringsmiddel som en oppblåsbar flåte. Siden fartøyet ikke skal ha mer enn et mannskap på rundt to personer vil det være tilstrekkelig med en liten flåte. Dermed kan en firemanns flåte være tilstrekkelig, og av hensyn til redundans foreslås fler flåter. Fartøyet er derfor modellert med to stykk flåter, hvor hver flåte er plassert på hver side av akterdekket. På denne måten vil det være trygg tilgang til en flåte selv om skipet skulle ha slagside.

13 Sjødyktighet

Valget av energibærer har introdusert nye problemstillinger i prosjekteringen av fartøyet. Et viktig fokusområde vil derfor være skipets egenskaper i ulike sjøkondisjoner, og hvilken innvirkning dette har på svinghjulene. I hovedsak kan det deles inn i to ulike problemstillinger. Den ene omhandler tapene som oppstår i svinghjulene som følge av bevegelse, og hvilke akselerasjoner det er trygt å utsette svinghjulene for. Den andre problemstillingen er forbundet med sjøkondisjoner og skrogets responser. Responsene i ulike sjøtilstander vil gi direkte følger til problemstillingen om tap, i tillegg til at svinghjulenes egne tyngdefelt vil medføre særegen karakteristik og dynamisk respons. Derfor er dette et sammensatt problem.

Grunnet begrenset kompetanse vil disse problemstillingene vektlegges i mindre grad enn øvrige fagdisipliner under prosjekteringen som del av strategien. Likevel presiseres det at disse problemstillingene må undersøkes ytterligere før svinghjul monteres om bord i en skipstype som dette. Konkrete undersøkelser av skrogformens oppførsel kan også være av relevans og bør gjennomføres. Ytterligere utledninger i denne prosjekteringen er basert på enklere antakelser og forenklinger.

13.1 Metode

I hovedsak er analysene som er gjennomført, gjort ved hjelp av programvaren Maxsurf Motions. Programvaren er egnet til oppgaven da eksisterende data om skroget og vektfordelingen er videreført fra tidligere arbeid med fartøyet. Programvaren kan beregne RAO, MSI, Added Resistance og akselerasjoner i forhåndsbestemte målepunkter. Med akselerasjoner er det mulig å undersøke hvor store krefter som vil oppstå der svinghjulene er montert ved ulike sjøkondisjoner fra flere retninger. MSI (Motion Sickness Index) er også en god indikator på fartøyet som arbeidsmiljø, og bør betraktes i samme operasjon. RAO for gitte operasjoner vil også kunne beregnes.

Problematikken som vil oppstå med dynamiske responser er mer utfordrende å simulere. Store roterende masser ombord i skipet vil fungere som gyroskop og vil kunne ha innvirkning på skipets bevegelse. Dette er spesielt viktig når 54 moduler monteres sammen i et lite skrog. Konsekvensene dette medfører kan simuleres i mer komplekse programvarer. Slike analyser vil gi nyttig data til videre dimensjonering av svinghjulenes innfestning da disse opptredende kreftene ellers er ukjent. Her kan også mer detaljert data angående tap undersøkes. Et eksempel på dette er hvordan innkommende sjø fra siden kan gå fra antatte rullebevegelser til stampbevegelser som følge av svinghjulenes gyro-effekter, kjent som gyroskopisk presesjon [72].

13.1.1 Akselerasjoner og tap

Akselerasjoner i svinghjulenes lokasjoner ble ikke undersøkt i Maxsurf. Årsaken til dette er manglende data fra Spinning Energy. Det er ukjent hvilke akselerasjoner svinghjulene tåler, og hva maksimal akselerasjon er satt til. I tillegg ble det begrenset med tid til å undersøke lokale bølgedata fra Storfjorden. For å uthente grundige analyser bør et godt bølgespekter ligge som input. Derfor ble ikke dette videre undersøkt.

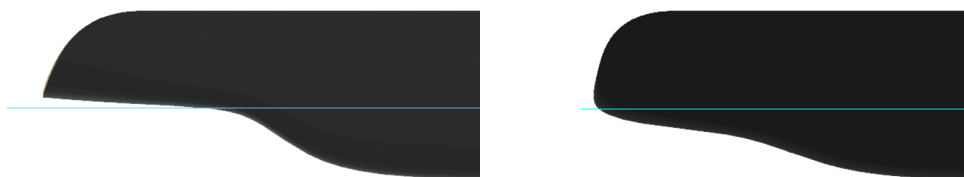
13.1.2 Dynamiske responser

RAO ble sett nærmere på og det ble satt en karakteristisk bølgehøyde til 0,25 meter. Et bølgespekter fra DNV ble brukt. Her ble det undersøkt hvordan skroget responderte til innkommende bølger forfra, og fra styrbord side.

I tillegg til undersøkelser av responser ble bevegelsene også kontrollert etter MSI. Motion Sickness Index er et standardverk som gir direktiv om hvilke bevegelser skipet skal ha, og hvordan dette påvirker komfort [73]. Dette ble undersøkt med samme bølgehøye og spekter som RAO.

13.2 Vurdering av resultater

Innkommende bølger fra styrbord side viste tegn til stamping sammen med de forventede responsene som rull og hiv. Mengden stamping som oppstod under den sideveise bølgen indikerte at store forflytninger av LCB forekom når bølger inntraff på skroget. En endring ble derfor gjort på skrogutformingen i akterskipet, hvor formene ble mer dynamiske og mindre bratte. Intensjonen var å gjøre volumendringen i store bølger mindre i akterskipet, noe som ville skape mindre stampebevegelser. Figur 13.1 viser endringen som ble foretatt i akterskipet. Dette ga også en gevinst i form av ekstra oppdrift i akterskipet som begrenset akterlig trim. Dette tiltaket kan også forbedre propellens instrømming av vann.



Figur 13.1: Endring i skrogform som resultat av testingen i Maxsurf Motions. Den første skrogformen er til venstre, den endelige til høyre.

I tillegg til en endring av skrogformen i akterskipet ble det også kontrollert at MSI-resultatene var innenfor begrensningene til ISO 2631 [73]. Resultatene er ytterligere dokumentert i Vedlegg J.

14 Struktur

Under utviklingen av et nytt skip er det viktig med en sikker konstruksjon. Skipet må konstrueres slik at det forekommer tilstrekkelig styrke og pålitelighet. For å oppnå dette følges DNVs regelverk for klasse HSLC som gir detaljerte direktiv og standarder for design og konstruksjon av skipets struktur. I denne seksjonen skal skrogets struktur og styrkemessige elementer utredes. Det skal fremlegges systematisk fra opptredende momenter og regelverk til dimensjonering av lokale og globale styrkegivende elementer.

Som følge av skrogformen er det naturlig å følge regelverket fra DNV, klasse HSLC. Klassen *High Speed and Light Craft* er nært beslektet med det grunnleggende regelverket for skip, men inneholder ekstra elementer for katamaraner og andre multiskrog. Eksempelvis vil katamaraner kreve ekstra fokus på tverrgående momenter og strukturens styrke over tunnelen [74].

Konstruksjonsmaterialet vil være aluminium. Derfor gjøres den globale analysen med kritiske snitt ved å framkalle motstandsmoment. For å danne et realistisk bilde på lett-skipsvekten er det også viktig å innhente gode verdier for opplagring av svinghjulene. Bærersystemet for disse hyllene må være tilstrekkelig for statiske og dynamiske laster. Bærersystemene for energilagrene vil gi godt grunnlag for vekt- og stabilitetsberegninger i tillegg til strukturvekten.

14.1 Metode

Innledningsvis vil regelverkets minimumsmomenter benyttes for å kunne gjennomføre første fase av strykeberegningen. Dette vil gi et grunnleggende datasett for de globale styrkeelementene. Dimensjoneringen av skrogbjelken kan videre brukes i stabilitet- og vektberegninger og vil senere gi ytterligere momenter som kan inngå i avsluttende runde med strukturanalyse.

Global styrke i skroget vil gjøres med DNVs programvare Nauticus Hull. Dataprogrammet tillater enkel beregning av tverrsnitts motstandsmoment. Ved å bruke programmet blir det mulig å framkalle korrekte verdier for dette fremfor forenklede håndberegninger. Da konstruksjonsmaterialet er aluminium vil det også være nødvendig å undersøke om buling kan forekomme i platefeltene. En manuell beregning skal utføres for denne undersøkelsen.

Lokale bærerrammer og svinghjulenes opplagring vil utgjøre siste del av styrkeberegningen hvor 3D-Beam vil brukes. Håndberegninger og resultatplot tilhørende struktur samt klassetegninger er å finne i Vedlegg K.

14.2 Topologi

Skipets topologi avgjøres av flere faktorer. Siden skipets lengde er kort, er det lite behov for avstivning langs skipet. Det er derimot krav til bøyestyrke langs flere akser da dette er en katamaran. En risiko ved å tverrskipsavstive er at motstandsmomentet over tunnellen blir for lavt. I en slik sammenheng bør det vurderes å legge bærerrammene på tvers av skipet slik at momenter over tunnellen kan tas opp i disse.

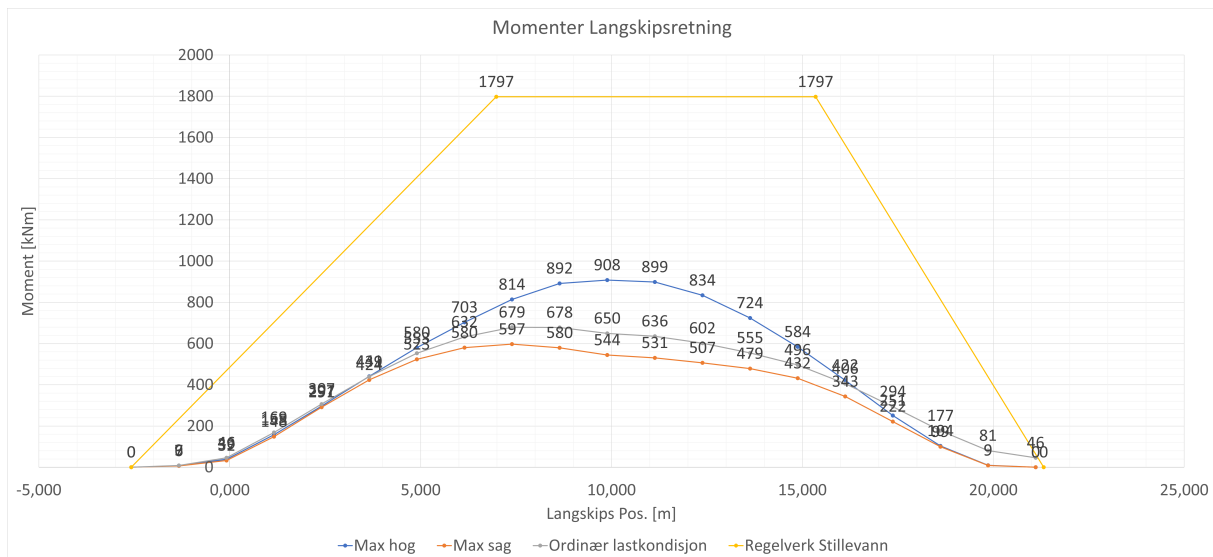
Ved å avstive lengdevis dannes mindre platefelt mellom bærerene som motvirker buling i feltene. Derfor prosjekteres det videre med langsips avstivning og bærer tverrskips. Innledningsvis brukes en stiveravstand på 400 millimeter og avstand til hver bærer settes til stiveravstanden ganger fem som gir 2000 millimeter mellom hver. Dette er også en fin inndeling da det kan plasseres en ramme mellom hvert andre svinghjulsenehet uten plassproblemer.

14.3 Global langskipsstyrke

Grunndata til global styrke vil innebære en kombinasjon av DNVs regelverk og data uthentet fra Maxsurf. De opptredende momentene i skrogbjelken må innhentes og sammenliknes med regelverket. Intensjonen er å styrkeberegne etter største potensielle moment, enten fremprovosert av egne lastkondisjoner, eller fra minimumsmomentet i regelverket. I tillegg til statiske momenter må det medregnes bølgeomenter. Momentene summeres og brukes samlet til den globale styrkeanalysen.

14.3.1 Langskips bøyemomenter

Regelverkets minimumsmoment er et godt utgangspunkt for første runde styrkeberegning. Minimumskravet vil gi en god indikator på nødvendig motstandsmoment. Med dette kan et tverrsnitt dimensjoneres med plater og stivere som videre kan danne grunnlag for første fase av vekstberegningene. Videre kan arbeidet itereres og gjøres mer presist ettersom nye vekstberegninger også tillater å hente ut beregnede stille vannmomenter fra Maxsurf. Avslutningsvis kan det gjøres en kontroll av disse og bekreftes at det største opptredende momentet er brukt til styrkeberegningen [75].



Figur 14.1: Momenter langskips for to kunstige kondisjoner (Max Hog og Max Sag), den ordinære lastkondisjonen og regelverkets minimumsmoment i stille vann.

I Figur 14.1 fremkommer det at regelverkets stille vannsmoment er større enn alle kondisjoner hentet ut fra Maxsurf Stability. Av lastkondisjonene som er presentert er følgende premisser underliggende:

- **Max Hog:** En kondisjon hvor alle energilager ved midtskipet er fjernet, og ballast-tanker i for- og akterskipet er fylt opp.
- **Max Sag:** En kondisjon hvor alle energilager i for- og akterskipet er fjernet, og ballasttankene i midtskipet er fylt opp. Det bemerkes at resultatet fra denne kondisjonen likevel gir et positivt moment som tilsier hogging. Dette indikerer at uansett last vil ikke sagging oppstå i skrogbjelken.
- **Ordinær Kondisjon:** Skipets ideelle kondisjon med alle vekter medregnet og ballast for å ligge på *even keel*.
- **DNV Stille vann Twin Hull Hogging:** En kunstig kondisjon er beregnet med formel 14.1 [75]:

$$M_{sw,Hog} = 0.5 \cdot \Delta \cdot L \quad (14.1)$$

Hvor Δ er skipets deplasement målt i tonn, L er skipets lengde. Enheten er kilonewtonmeter.

Siden det største momentet er regelverkets stille vannsmoment, M_{sw} , blir dette videreført som signifikant verdi å styrkebregne etter. Det er ingen krav til et stille vannsmoment for Sagging fra DNV [75].

I tillegg skal det summeres inn et bølgemoment, M_w , som tar høyde for dynamiske laster:

- **Hogging:**

$$M_{w,Hog} = 0.19 \cdot C_w \cdot L^2(B_{WL2} + k_2 \cdot B_{tn}) \cdot C_B \quad (14.2)$$

- **Sagging:**

$$M_{w,Sag} = 0.14 \cdot C_w \cdot L^2(B_{WL2} + k_3 \cdot B_{tn}) \cdot C_B + 0.7 \quad (14.3)$$

Hvor C_w er en bølgekoeffisienten avgjort av skipets lengde og fartsområde, B_{WL2} er bredden i vannlinjen ved midtskipet, B_{tn} er tunnelens bredde. k_2 og k_3 er konstanter spesifisert i regelverket. Enheten er kilonewtonmeter.

Grunnet lave saggingmomenter i denne korte konstruksjonen vil hoggingmomentet være det dimensjonerende momentet. En samlet oversikt over alle globale maksimumsverdier er presentert i Tabell 14.1. Momentene betegnet med DNV HSLC TwH. er beregnet med formlene 14.1, 14.2 og 14.3 [75].

Tabell 14.1: Viser alle maksimumsverdier for regelverket og lastkondisjoner. Grønne verdier er størst for hogging og gule er største for sagging.

Kondisjon	Still Water		Wave	
	Hogging [kNm]	Sagging [kNm]	Hogging [kNm]	Sagging [kNm]
DNV HSLC TwH.	1797	0	545	-855
Ordinær Lastkondisjon	679	-	-	-
Max Hog	908	-	-	-
Max Sag	597	-	-	-

Totalt summeres dette til følgende globalt moment:

- **Hogging:**

$$M_{tot,Hog} = M_{sw,Hog} + M_{w,Hog} \quad (14.4)$$

- **Sagging:**

$$M_{tot,Sag} = M_{sw,Sag} + M_{w,Sag} \quad (14.5)$$

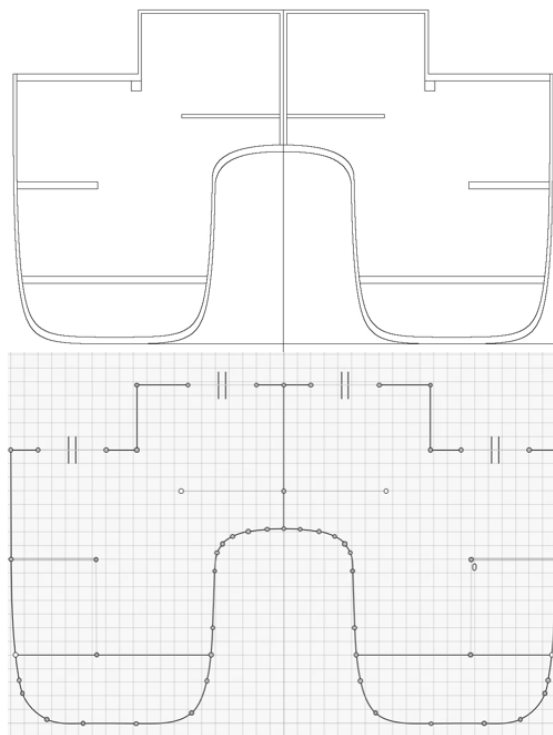
Samlet gir dette et totalt globalt moment som vist i Tabell 14.2. De totale momentene er beregnet med formelene 14.4 og 14.5 [75].

Tabell 14.2: Totale globale momenter sammensatt av stille vann og bølger.

	Hogging	Sagging
M_{tot}	2342 kNm	-855 kNm

14.3.2 Kritiske Snitt

Den globale styrkeanalysen krever tverrsnittsdata. Det må derfor hentes ut et kritisk snitt fra de tekniske tegningene som skal benyttes til videre strukturanalyser. Tverrsnittet hentes ut fra skipets midtre seksjon hvor globale momenter er størst. I tillegg er det viktig å bruke en seksjon hvor geometrien har luker og dører som påvirker tverrsnittets areal og motstandsmoment. Dette er viktig da skipets minst styrkegivende tverrsnitt må være i stand til å motstå de globale langskips bøyemomentene. Figur 14.2 viser spant #15 som er lokalisert ved nullkryss. Snittet er valgt da det ligger i seksjonen på skipet hvor momentene er størst. I tillegg har snittet flere dekksluker som har viktig innvirkning på motstandsmomentet. Monteringsflatene til svinghjulene vil ikke være med i den globale styrkeanalysen, og er derfor tegnet inn som *dummy panels*.



Figur 14.2: Kritisk snitt i spant #15 før (øverst) og etter det er generert i Nauticus Hull (nederst).

14.3.3 Nauticus Hull

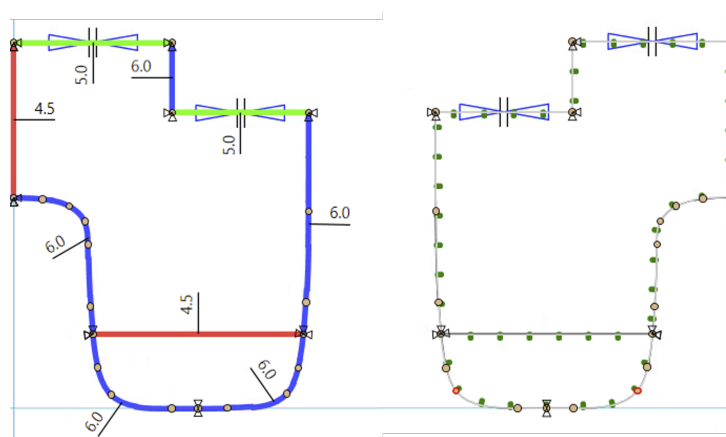
Nauticus Hull krever grunnleggende skipsdata når analysen igangsettes. Hvilken klasse og skiptype må også avklares. *RestrictionArea* er også en definert parameter som må avklares. Graden av restriksjonsområde er forbundet med skipets operasjonsområde og restriksjonsgrad R4 er valgt. Dette gir en C_w lik 1,15 for de globale momentene [76].

Etter å ha definert geometrien i Nauticus Hull kan struktur videre utarbeides. Grunnet et kort skrog og lavt deplasement er momentene lave og tverrsnittets motstandsmoment vil være av mindre betydning. Regelverket stiller minimumskrav til platetykkelser og dette vil gi størst utslag. Minimumstykkelser er avgjort av platenes lokasjon. Platenes lokasjon stiller ulike krav til korrosjonstillegg. Eventuelle innvendige tanker må også deklarerer, da dette

også vil medføre krav til korrosjonstillegg. I Nauticus Hull kan denne prosessen effektiviseres, og riktige platetykkelser kan enklere bekreftes. Resultatet er presentert i Figur 14.3.

Alle ytre hudplater er forenklet til 6,0 millimeter tykkelse. Dekksplater kreves til 5,0 millimeter og interne plater som tanktopp og det vertikale langsgående skottet over tunnelen er 4,5 millimeter tykke. Årsaken til at enkelte seksjoner er forenklet til samme tykkelse kommer av at minimumskravet er rimelig likt, men at en kombinasjon av mange tykkelser er unødvendig krevende til produksjon og videre arbeid. Derfor ble enkelte plater på yttersiden økt til 6,0 millimeter fra minimumskravet på 5,5 millimeter.

Stivere er plassert med en avstand på 400 millimeter og gir tverrsnittet en liten økning i motstandsmoment. Det brukes Flatbar 50x5 som stivere, som er innenfor regelverkets minimumskrav. Det plasseres stivere i tanktopp, langs hele ytre hud og i dekkene. Stivernes rolle er å videreføre kreftene fra platefeltene inn til bærerrammene.



Figur 14.3: Valgte platedimensjoner og fordeling av stivere typ. FB 50x5.

I Tabell 14.3 er tverrsnittets egenskaper presentert. Motstandsmomentet benyttes sammen med det største aktuelle momentet til å finne spenningene i toppen og bunnen av skrogbjelken.

Tabell 14.3: Tverrsnittsdata for det kritiske snittet.

Motstandsmoment, Z_{deck}	0,257	m^3
Motstandsmoment, Z_{bottom}	0,249	m^3

Tabell 14.4 viser resulterende spenninger ved det maksimale Hogging-momentet fra regelverket.

Tabell 14.4: Tverrsnittsdata for det kritiske snittet.

σ_{deck}	9,1	MPa
σ_{bottom}	9,4	MPa

14.3.4 Bulekontroll

Spenningsene i toppdekk og bunnen fra den globale analysen må være innenfor en gitt spenning for å unngå buling i platefeltene. Om det påvises buling er det behov for tykkere plater, smalere stiveravstand eller ekstra bulestivere i platefeltene. I denne kontrollen gjøres en enkel sjekk av platefeltene i topp og bunn hvor spenningsene er størst. For å kontrollere hele skroget vil det kreve interpolering av spenninger i hvert platefelt. Denne prosessen fordenkles derfor noe. Den kritiske bulespenningen beregnes ved hjelp av Euler-spenningen gitt med Formel 14.6 [77].

$$\sigma_{EULER} = C \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{12(1 - \nu^2)} \cdot \left(\frac{t}{s}\right)^2 \quad (14.6)$$

Gjeldende egenskaper for gitte tilfelle med aluminium er:

- Bulekonstanten, C. C = 4 i et rett belastet platefelt.
- Elastisitetsmodulen, E. E = 70 000 MPa for aluminium [53].
- Poissons forhold, ν . $\nu = 0,33$ for aluminium [77].
- Platetykkelse, t. t = 6 mm i topp og bunn.
- Platefeltets korteste spenn, s. s = 400 mm

Eulerspenningen gir følgende bulespenning i platefeltene og det bemerkes at opptredende spenninger er lavere. Det utnyttes om lag 16% av platefeltets bulekapasitet. Resultatet er presentert i Tabell 14.5.

Tabell 14.5: Bulekapasitet i topp og bunn. Utnyttelsen viser hvor stor grad av bulekapasiteten som er benyttet.

Lokasjon	Spenninger [MPa]	Bulekapasitet [MPa]	Unyttelse
σ_{deck}	9,1	58	15,7%
σ_{deck}	9,4	58	16,2%

Det er kontrollert at beregnede kapasitet er mindre enn halve flytegrense. Derfor er ingen korleksjon i σ_{EULER} blitt gjort.

14.4 Global Tverskipsstyrke

Regelverket tar også for seg nødvendig struktur over tunnelen. For katamaraner må motstandsmomentet være tilstrekkelig over tunnelen for å tåle tverrgående momenter. De tverrgående momentene er en konsekvens av at hvert oppdriftselement er forskjøvet fra senterlinjen. Derfor er dette en ekstra del av regelverket klasse HSLC [75].

For katamaraner med lengde over 50 meter og $\frac{V}{\sqrt{L}} \geq 3$, skal det tverrgående momentet bregnes med Formel 14.7. Skip under denne begrensningen trenger ikke godkjenne strukturen over tunnelen. I dette tilfellet er det derfor ingen krav å gjennomføre denne analysen. Skipet er under 50 meter og $\frac{V}{\sqrt{L}}$ er lik 2 med en maksimal hastighet satt til 10 knop. Det er likevel valgt å undersøke strukturens styrke over tunnelen. Regelmomentet er beregnet med følgende formel: [75]

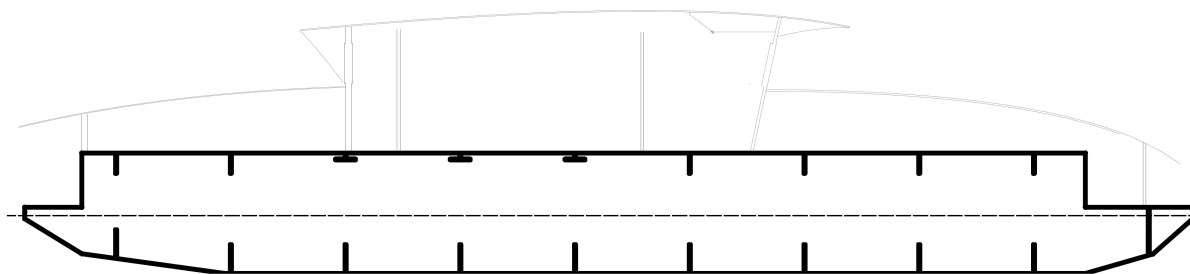
$$M_s = \frac{\Delta \cdot a_{cg} \cdot b}{s} \quad (14.7)$$

Hvor Δ er skipets deplasement, b er avstanden mellom hvert halvkrogs senterlinje, a_{cg} er vertikal akselerasjon og s er en faktor avgjort av restriksjonsområdet. For restriksjonsområde R4 er a_{cg} satt til 9,81 og s er satt til 8. Tabell 14.6 viser M_s for fartøyet.

Tabell 14.6: Resulterende tverrskipsmoment med Formel 14.7.

M_s	922	kNm
-------	-----	-----

Manuell beregning av snittets egenskaper gjennomføres med AutoCAD som hjelpemiddel. Strukturen over tunnelen tegnes opp med riktige platetykkelser for ytre hud og innvendig bærerstruktur. Med en 1:1 tegning av strukturen kan linjene konverteres til en region og egenskapene kan hentes ut i en rapport. Figur 14.4 viser linjene fra AutoCAD. Alle platetykkelser og profiler er skalamessig korrekte.



Figur 14.4: Tverrsnittet av global struktur langs midtskipet (over tunnelen). Grå linjer av overbygg er kun illustrative.

Fra AutoCAD fremkommer følgende verdier vist i Tabell 14.7.

Tabell 14.7: Tverrsnittsdata for det kritiske snittet.

Motstandsmoment, Z_{deck}	0,721	m^3
Motstandsmoment, Z_{bottom}	0,779	m^3

Tabell 14.8 viser resulterende spenninger ved regelverkets momenter.

Tabell 14.8: Tverrsnittsdata for det kritiske snittet.

σ_{deck}	1,28	MPa
σ_{deck}	1,18	MPa

Fra resultatene er det tydelig at strukturen over tunnelen er godt tilstrekkelig mot disse momentene.

14.5 Lokal Styrke

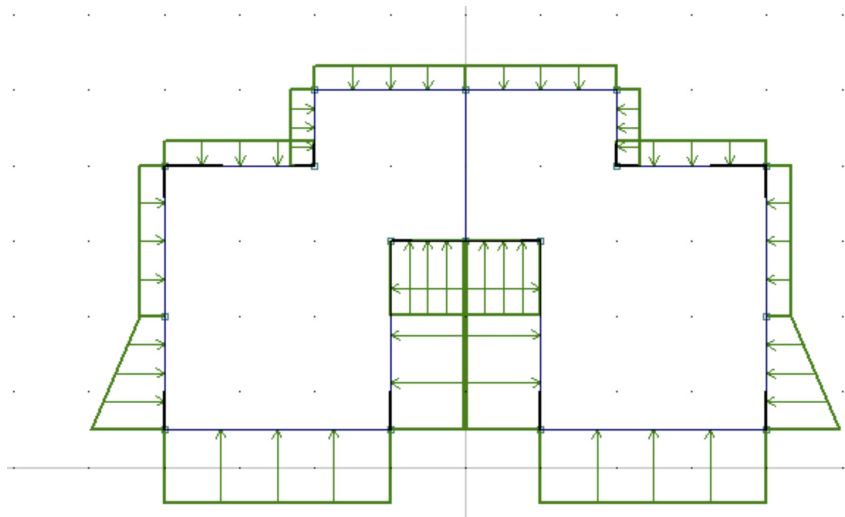
Bærerstrukturen er neste steg i kraftgangen. Fra platene vil lasten fra sjøtrykket overføres til stiverene, og disse må inspennes i bæringsrammer som samler kraftgangen. Det viktigste er at rammene er tilstrekkelige dimensjonert for å håndtere alle belastninger. Bæringsrammene modelleres i 3D-Beam med et forenklet tverrsnitt.

Den omgående strukturen består av bjelkeprofiler hvor ytre hudplater videreføres fra den globale strukturanalysen. Dobbeltbunnen gir naturlige flensestykker og bæreren i bunnen vil tilsvare steget på profilen.

Lastkondisjonen er fastsatt ved å beregne sjøtrykket ved båtens dypgang. Opp mot sidene avtar trykket ned til en halv meters sjøtrykk. Denne lasten videreføres også over på dekkene. Under tunnelen brukes samme sjøtrykk som i kjølen. Hvert platefelt tilsvarer en lengde på to meter, og ved å inkludere dette vil trykket omsettes til en linjelast. En dynamikkfaktor på 1,5 legges også til. Linjelasten er beregnet med formel 14.8. En visuell fremstilling av lasttilfellet er vist i Figur 14.5.

$$q_{dim} = \rho \cdot g \cdot T \cdot s \cdot f_D \quad (14.8)$$

q_{dim} er linjelasten det dimensjoneres med. ρ er tettheten til sjøvann målt i $\frac{kg}{m^3}$, g er tyngdeakselerasjonen, T er skipets dypgang, s er bæreravstanden og f_D er dynamikkfaktoren.



Figur 14.5: Rammen tegnet i 3D-Beam med dimensjonerende laster påført.

I dimensjoneringen av bærerprofilene er det viktig å ikke overgå flensenes nyttige størrelse. Selv om platefeltene vil ha en lengde på to meter mellom hver ramme, er ikke hele spennet i stand til å ta opp spenninger av lasten. Stiverne og platene skal forsørge god kraftgang inn til bærerprofilen, men profilen selv må kun dimensjoneres etter den lokale tilgjengelige effektive flens.

I flere lasttilfeller kan den effektive flensen antas om lag $\frac{1}{20}$ av bjelkens lengde. Dette er noe annerledes ved små bjelkespenn. For å unngå feilaktige antakelser benyttes 3D-beams egne innebygde kalkulator til å optimalisere hver bjelkeprofilens effektive flens. Dette gjør at alle flensbredder er i henhold til DNVs spesifikasjon [77].

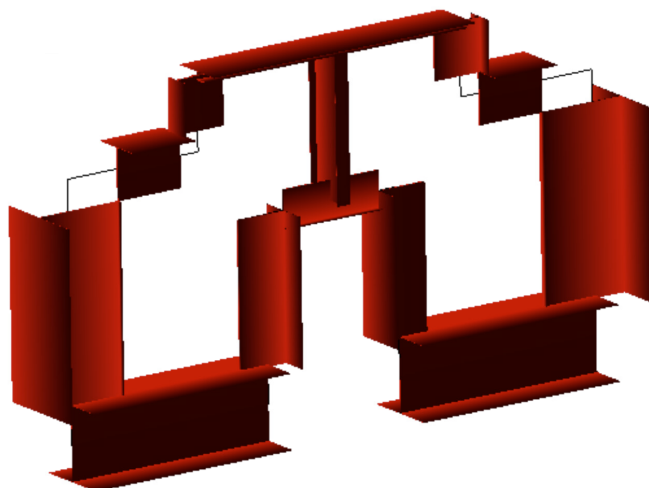
Som resultat av spenning- og bulekontroll velges følgende profiler til bærerrammene vist i Tabell 14.9.

Tabell 14.9: Valgte bærerprofiler

Lokasjon:	Bærerprofiler fra 3D-Beam						
	Ytre hud		Steg		Indre flens		Effektiv flens
	t [mm]	h[mm]	t [mm]	h[mm]	t [mm]	h[mm]	Avgjort av bjelkens spenn og bredde
Bunn	6	1050	8	1000	5	1050	1050
Side utvendig	6	1340	12	1200	15	100	1340
Side tunnel	6	760	25	700	0	0	760
Tunneltak	6	200	20	500	0	0	760
Hoveddekk	6	760	25	700	0	0	760
Vertikal bærer	6	380	25	700	0	0	380
Toppdekk over teknisk	6	760	20	100	15	350	760
Toppdekk over svinghjul	6	760	20	300	0	0	760
Langsgående senter	5	200	4,5	570	5	200	570

Figur 14.6 viser solid struktur av rammen med valgte bærerprofiler og stive hjørner. Illustrasjonen inkluderer de stive hjørnene. Det er også kun effektive flens som er synlig, og

platefeltet er derfor litt bredere enn illustrasjonen viser.



Figur 14.6: 3D-modell av bærrammen og ytre plateflenser.

14.5.1 Lastfordeling og opplagring

Internt i konstruksjonen er det også viktig å ha tilstrekkelig styrke. Bærersystemene til svinghjulene må tåle svinghjulenes egenvekt og andre dynamiske laster. Solid bærerstruktur til energilagringseenhetene er essensielt, og eventuelle feil kan medføre høy økonomisk og sikkerhetsmessig risiko. Langs sidene skal enhetene stå på hyller som opplagres inn mot skrogsiden og på pillarer ned i tanktop. Over tunnelen vil et enklere system konstrueres hvor svinghjulene boltes direkte ned på egne plater i skipets bærersystem.

Hyller ved sidene til svingjulene tegnes i 3D-beam. Det lengste lasttilfelle med seks enheter er brukt. Dette tilsvarer de to bakre seksjonene på hver side (mellom spant 3-13 og 13-23). Dimensjonerende lasttilfelle skal bestå av enhetenes egenvekt, en dynamisk faktor og vrilmomentet ved maksimal akselerasjon i rotasjonselementet. Egenvekten omsettes til kraft i Newton og lastfaktoren settes til 2. Dette tilsvarer dobbel belastning i dynamiske kondisjoner. Kondisjonen skal utprøves både som utbredte laster og som punktlaster midt på hver monteringsflate.

Hyllene opplagres langs nodene ved veggen og i bunnen av pillarene. Ingen av innfestningspunktene er faste, så ingen momenter vil gå via disse. Dette er basert på antakelsen om at innfestningen vil bestå av bolter eller vibrasjonsdempende festemekanismer.

Vrimomentet beregnes med forenklet fysikk relatert til rotasjonslegemer. Basert på Spinning Energys informasjon skal C-raten til enhetene være på 10, som tilsvarer en minimums ladetid på 360 sekunder. Rotasjonselementet skal ha en egenvekt på 600kg og radiusen på elementet er 0,4m. Denne dataen kan gi en gjennomsnittlig vinkelakselerasjon og vrilmoment beregnet ved hjelp av likningene 14.9 og 14.10 [78].

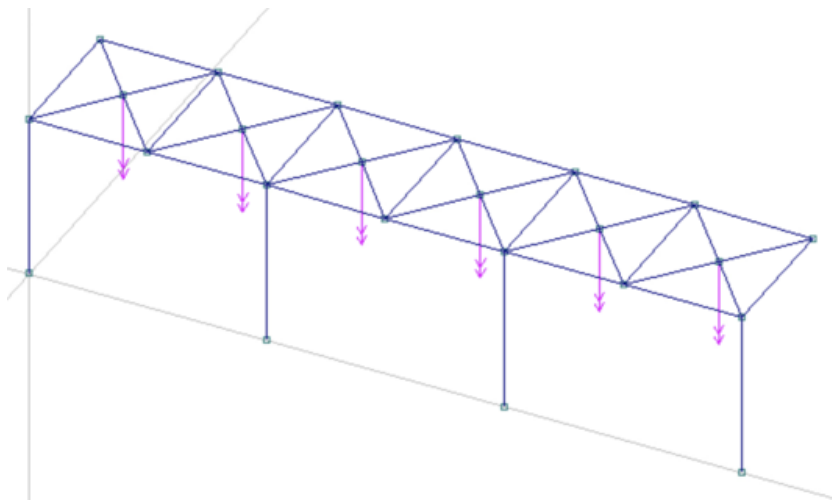
$$\alpha_{avg} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{t_S} \quad (14.9)$$

Hvor α_{avg} er gjennomsnittlig vinkelakselerasjon målt i radianer per sekund i andre. ω_1 og ω_2 er vinkelhastigheten før og etter akselerasjonen oppgitt i radianer per sekund. t_S er tidsrommet akselerasjonen foregår i.

$$Q = \alpha \cdot I_t \quad (14.10)$$

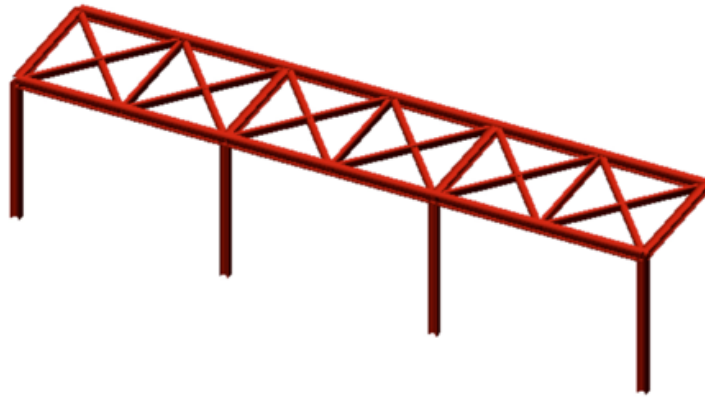
Hvor Q er systemets vrilmoment, α er vinkelakselerasjonen fra formel 14.9 og I er rotasjonslegemets treghetsmoment. For I er formel for en solid disk brukt: $I_t = \frac{m \cdot r^2}{2}$ [79].

Beregningene gir et vrilmoment på 400 Newtonmeter ved raskeste oppladning av svinghjulene. En margin på 25% legges til og dimensjonerende vrilmoment i senter av hvert svinghjul blir da 500 Newtonmeter og videreføres til analysen i 3D-beam. Hvert svinghjul har en egenvekt på 1200 kg og med oppgitte lastfaktor gir hver svinghjul en last på 23,54 kilonewton. Dette gir tilfellet vist i Figur 14.7. Mest kritisk tilfelle oppstod når svinghjulene ble satt som en punktlast i senter av hvert monteringsfelt.



Figur 14.7: Lasttilfelle med vrilmoment og punktlast i senter av hvert monteringsfelt. Konstruksjonen er en bæringshylle til seks enheter.

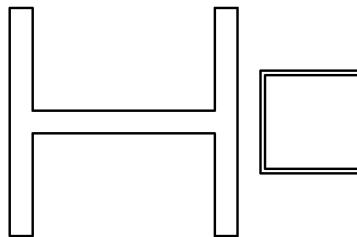
Kontrollen i 3D-beam innebærer både spenninger og søyleknekking. Derfor er det viktig å kontrollere at konstruksjonen er tilstrekkelig i henhold til begge analyser. En visuell framstilling av bæringshyllene er vist i Figur 14.9.



Figur 14.8: En solid illustrasjon av en bæringshyllje i aluminium.

Resultatet gir følgende dimensjoner av bjelkene i aluminium:

- Vertikale pillarer: HEB100
- Horisontale rammer: HEB100
- Diagonale bærearmer: Kvadratisk rør 45x45x2mm



Figur 14.9: HEB-profilen som brukes i vertikale pillarer og horisontale rammer til høyre. Kvadratisk rørprofil til diagonale bjelker til venstre.

Den resulterende bæringshylljen har en totalvekt på 398kg når aluminium er konstruksjonsmaterialet. Dette tilsvarer en utbredt vekt på 66kg per meter. Dette brukes videre som den utbredte vekten for alle bærersystem til svinghjulene.

15 Kostnadsestimat

En kostnadskalkyle er et viktig verktøy i skipsprosjektering. Det gir en oversikt over de økonomiske konsekvensene av et produktet. Kalkylen er et godt verktøy for beslutningstaking og for videre arbeid med finansiering. For dette prosjektet vil kostnadskalkylen være sentral for å estimere kostnader knyttet til skipets tekniske løsning, og energilageret.

Formålet er å kvantifisere alle kostnader. Det vil si en oversiktlig inndeling av skipets ulike systemer. Ut i fra dette kan den totale kostnaden summeres. For å skille på skipets tekniske elementer og energilageret vil prosessen være todelt. Årsaken til dette er prisen på energilageret og dets betydning på den totale summen. Derfor vil en todeling gi best overblikk og inntrykk av skipets kostnader.

15.1 Metode

Kostnadene av skipets konstruksjon er en sammensetning av grunnleggende materialer, montering og produksjon samt pris på enkeltkomponenter. Flere elementers pris regnes med enkeltkomponenters innkjøps- og monteringspris, men konstruksjonsmaterialer er ofte enklere å estimere ved hjelp av mål som vekt, lengde, eller areal. Kabler har eksempelvis innkjøpspris per meter, og konstruksjonsmaterialer som stål kan ha pris basert på massen av material. Monteringskostnaden kan estimeres ut fra antall arbeidstimer brukt av verftet.

Estimering av energilagringssystemet blir gjort med en summering av prisen til energilagringseenhetene, sammen med tilhørende elektrisk grid. Det vil kreves kabling som tåler oppgitt strøm, og systemer som regulerer spenning og effekt til både fremdrift av skipet og lading til andre fartøy.

15.2 Fartøy

For estimering av skrogets kostnad i aluminium og glassfiber-sandwich blir prisen basert på vekt av material lagt til grunn. Det blir også gjort et estimat av monteringskostnaden til skroget og overbygget basert på arbeidstimer. Basert på materialvekt vil skipet få en kostnad av konstruksjonsmateriell på 2 400 000 NOK, og en monteringskostnad på antatt 5 000 000 NOK.

Store komponenter som propulsjonssystemer er utfordrende å finne nøyaktige priser på uten et tilbud fra en leverandør med kontekst til resten av prosjektet. Andre metoder er å se på prisen av brukte deler til salgs, eller tidligere estimater av samme type komponent hvor pris kan antas å skaleres med komponentens størrelse og kompleksitet. Som estimat for propulsjonssystemer antas pris på hovedthrustere til 2 000 000 NOK per enhet, og baugthrustere på 500 000 NOK per enhet.

Utstyr relatert til navigasjon og drift av fartøyet kan variere stort i pris. Dette er ofte utstyr som fartøy er lovpålagt å installere og som ofte har billige alternativ som imøtekommer minimumskrav. Med tanke på at dette fartøyet skal kunne driftes autonomt på sikt vil det kunne stilles større krav til kvaliteten av enkelte komponenter som sensorer. Med en sammensetning av priser på komponenter relatert til bro, navigasjon og sensorer lander et estimat på bro-utrustning på 3 650 000 NOK.

Til resten av styrhusets utrustning i form av innredning brukes ordinære materialer og deler som kan gi en totalpris på 362 000 NOK. I teknisk rom under styrhuset vil nødgenerator og elektriske systemer ta majortiten av kostnadene. Med en 300 kilowatt motor og generator estimeres en pris på 880 000 NOK.

Av annet lovpålagt utstyr er det sikkerhetsutstyr både internt og eksternt på fartøyet som tar en del av kostnadene. Totalt sett antas ankersystemet å koste 400 000 NOK, og redningsflåter 40 000 NOK. Av annet generelt sikkerhetsutstyr estimeres en pris på 250 000 NOK.

15.3 Energilager

Energilagringenhetene fra Spinning Energy har en oppgitt pris på 1,2 millioner kroner per enhet [3]. Med 54 installerte enheter blir prisen av selve enhetene totalt 64 800 000 NOK. Det antas også 10 000 000 NOK ekstra til alle systemer som transformatorer, omformere, og strømtavler som skal kontrollere og distribuere energi i fartøyet. Til kabling mellom hoved-tavler og alle energilagringenhetene estimeres et behov for 448 meter med kabler som skal kunne ta 1000 volt ved 250 kilowatt. Med en pris på 1 200 NOK per meter blir det en totalpris på 537 600 NOK for kabling.

Hvordan skipet skal ta inn og ut strøm ved land eller andre fartøy blir etterlatt til videre vurdering. Et relevant alternativ er induksjonslading, som kan antas å koste opp mot 5 000 000 NOK.

15.4 Resultat

Sum	99,884,800 NOK	
Sum excl. ES	35,084,800 NOK	35% av totale kostnad
Sum ES	64,800,000 NOK	65% av totale kostnad

Figur 15.1: Totale estimert kostnad av skipet. ES er energilagerets kostnad.

I Figur 15.1 presenteres den totale kostnaden for konstruksjon og utrustning av fartøyet. For sammenligning av skipets egen pris opp mot energilagringenhetene er summen for

fartøyet uten enhetene også satt opp. Skipets egen pris ekskludert energilagringseenhetene inkluderer fortsatt *transformator* og *charger system* som sammen kan være verdt opp mot 15 000 000 NOK. Dette setter perspektiv på at skipet i seg selv er enkelt og rimelig konstruert sammenlignet med energisystemene ombord. Regnearket for kostnadsestimatet er i Vedlegg L.

16 Diskusjon

Diskusjonen er inndelt etter hver respektive del fra rapporten.

16.1 Grønn Kai-konsept

Utgangspunktet for oppgaven var resultatene fra sommerprosjektet “Grønn Kai” 2022. Med fokus på energimangel og alternativ bruk av nullutslippsfartøy oppstod behovet for tilførsel av energi. Som belyst i innledningen har problematikken eksistert lenge, og ingen god løsning er klar foreløpig. En energifrakter som dette vil gi en god midlertidig løsning, men en turistdestinasjon med høyt besøkstall årlig, er lite aktuelt å støtte ved hjelp av et skip i all fremtid.

Som en midlertidig løsning vil dette fartøyet kunne bistå til verdensarvfjorder med nullutslipp. Horisonten for realisering av dette er dog noe uklart. Ved å prosjektere en skipstype som har få aktuelle skip å sammenlikne med, er det vanskelig å argumentere for denne løsningen uten grundig testing. Utover dette er det benyttet en energibærer som per nå er ukjent brukt til langtidslager både på hav og på land. Dette kan medføre store utsettelse og en løsning klar innen 2026 blir derfor krevende.

Det er også vanskelig å bekrefte om fartøyet vil være i stand til å gå ubemannet i sin levetid. Selv om strekket er brukt til testing av autonome skip i dag, er det ingen kommersielle bruksområder ennå [26]. Autonomien introduserer større investeringskostnader, behovet for ytterligere forskning og nye dilemma angående risiko. Om dette overgår prisen av å drifte skipet med bemanning, er det liten argumentasjon for å satse på autonomi. Tatt i betraktning at skipet er holdt under 24 meter skal mannskap med lavere grad av sertifisering være tilstrekkelig. Dette kan også redusere operasjonskostnader med personell.

16.2 Energilager

Energibæreren ble valgt på grunnlag av de tekniske egenskapene, pris, livsløp og reguleringer. I tillegg til dette ble det oppfattet fra “Grønn Kai”-rapporten at svinghjul var foretrukket. Argumentasjonen fra sommerprosjektet var basert på energitetthet og reguleringer. I tillegg var det et ønske å ha en fremtidsrettet profil med en ny bærekraftig energibærer. Altså et pilotprosjekt med moderne teknologi.

Utfordringen med dette ligger i energibærerens modenhet og tilgjengelighet. I tillegg er det uklart hvordan tap og sikkerhet vil ivaretas om enhetene skal stå i en bevegelig applikasjon som på skip. Derfor er det ikke sikkert Spinning Energys teknologi er riktig rute å gå om dette er et hasteprosjekt. Om intensjonen er å ha disse løsningene klare innen 2026, virker svinghjul urealistisk. Denne utfordringen var med på å omsette prosjektets ordlyd til et konsept. En visjon for fremtiden, uavhengig av energibærerens usikre modenhet.

Det har likevel vært målsetning gjennom hele arbeidet at konseptet skal utvikles og prosjekteres for virkelige applikasjoner. Et tiltak som kan akselerere realismen i prosjektet vil derfor være å gå for batteri. På tross av vurderingen gjort tidlig i prosjektet som konkluderte med at svinghjul var svært egnet, er batterier mulig. Volumet internt i skipet er stort nok for batterier, og det antas at brannisolasjon og slukkesystemer skal passe uten plassbegrensing. Siden skipet er dimensjonert av regelverkets minimumstykkelser i plater og stivere er det heller ikke noe behov for ytterligere strukturutbedringer. Derfor er batterier en mulig løsning om prosjektet skal realiseres på kort sikt.

Under prosjektet ble det kjent at svinghjulene skulle kobles på strømmettet fra undersiden av enhetene. Rom for kraftige kabler og servicetilgang ble derfor løst ved å løfte svinghjulsmodulene 1,4 meter opp, stående på hyller. Det var uønsket å plassere moduler over hverandre i høyden. Ved å løfte modulene opp på hyller ble også noe av katamaranens stive stabilitetskarakteristikk bedre. Ulempen med dette tiltaket er at det tas opp et større volum per enhet. Svinghjulene tar opp 1,5 meter høyde og det ble anbefalt minimum 30 centimeter under til oppkobling. Derfor ble 1,8 meter inkludert i beregningen av energitetthet. Plassen under ble økt fra 30 centimeter til 1,4 meter, og derfor ble totalt høyde per installasjon 2,9 meter som tilsvarer 2,9 kubikkmeter. Dette gir nesten en halvering av energitettheten, og gjør at batterier ikke er like ugunstige som først antatt.

Batterier vil tillate prosjektet å realiseres raskere. Likevel er det andre konsekvenser denne energibæreren medfører. Volumet slukkemiddel, isolasjon og sikkerhetssystemer krever er langt større enn hva som trengs for svinghjulene. I tillegg til plass innebærer dette ekstra kostnader. Sammenlikningen med batteri ble også gjennomført med antakelsen om at energilagerene var like store. Dette avviker fra praksis. For å ivareta batterienes levetid, anbefales ofte ladninger på lavere effekt og at cellene aldri lades helt opp. En tommelfingerregel er ofte å holde utladningsdybden i intervallet 20 % til 80 %. Dette gir et nyttbart intervall på 60 %. Om denne energimengden skal være i stand til å oppfylle driftsprofilens krav, vil batteripakkens størrelse måtte økes ytterligere. For å gjøre dette må energilageret være 67 % større på om lag 24 megawattimer.

Et energilager på 24 megawattimer med typisk pris per kilowattimer for litium-ionbatterier vil da koste nærmere 40 millioner NOK. I tillegg til dette kommer alle ekstra støtte- og sikkerhetssystemer. Med en antatt levetid på 10 år gir dette en årlig fordelt investeringskostnad på minst 4 millioner NOK per bruksår. Med forbehold om at svinghjulene er godt nok dimensjonert for skipet og ikke trenger ytterligere kapasitet gir det en fordelt årlig fordelt investeringskostnad på 3,5 millioner NOK. Dette tallet blir lavere enn litium-ion batterier siden levetiden til svinghjul er betraktelig lengre. Dette tyder på at svinghjul var et godt valg selv om begge energibærerne kan utføre oppgaven. Beregningen fremhever at prisen for svinghjul ikke er så høy som først fremstilt.

Livsyklusperspektivet er også viktig når det skal argumenteres for bærekraft og miljøvennlige valg. Av forskningen som ble undersøkt var *Energy and environmental footprints of flywheels for utility-scale energy storage applications* [37] brukt som grunnlag. Artikkelen ble

publisert i 2021 og ansees derfor som svært aktuell. Forskningen er gjort ved Universitetet i Alberta og er gjennomført av fire Ph.D stipendiater og doktorer innenfor mekaniske fag, energi og informatikk. Dette ansees som en pålitelig kilde.

Artikkelen viste til klimagassutslippene fra *krybbe-til-port*, avtrykket fra råmaterialer, produksjon og distribusjon av produktet. Studiet viser til et lavere klimagassutslipp for svinghjul enn elektro-kjemiske løsninger. Komposittsvinghjul hadde omtrent halvparten så mye klimagassutslipp i *krybbe-til-port*-sammenlikningen som litium-ionbatterier. Dette var også med på å underbygge valgt energibærer. Flere artikler om temaet var utforende å finne.

Det er ikke tatt høyde for tapene som kan forekomme under transport i beregningene, kun tap i energiovergang inn og ut av svinghjulene. Det er usikkert hvor mye dette må vektlegges da Spinning Energy har nevnt lite om tap og bevegelser i dialogen med de. Det er også ukjent hva som ligger til grunn av fremtidig regelverk for svinghjul i skip. Om det kreves et eget sikkerhetssystem, særegne krav til innfestning eller avlukkede beskyttelsessoner i tilfelle rotorhavari, vil dette endre situasjonen noe. Det er valgt å ikke se på dette i oppgaven.

16.3 Drift

Endelig installert energilager hadde kapasitet på 13 500 kilowattimer. Av dette er 1 670 kilowattimer dedikert til fartøyets egen drift. Det vil si at 835 kilowattimer er dedikert per tur til skipets egen fremdrift og drift av systemer. Med en antagelse at 90 % av skipets energiforbruk går til fremdrift, betyr det at motorene vil ha satt av 752 kilowattimer til total fremdrift per tur. Ytterligere 1350 kilowattimer utgjør en 10 % sikkerhetsmargin. Gjenværende kapasitet etter egen fremdrift og sikkerhetsmargin er da 10 480 kilowattimer. Dette er nok energi til fire oppladninger fra 20 % til 80 % av nullutslippsbåtene driftsprofilen er basert på.

I et scenario hvor vanskelige værforhold vil forekomme, vil det være et behov for ekstra energi til fremdrift. Det er antatt et ekstremtilfelle hvor 500 kilowatt motoreffekt kreves for at fartøyet skal holde 8 knop. I denne situasjonen vil det forbrukes 1 600 kilowattimer per tur på 25 nautiske mil, som er mer enn avsatte 752 kilowattimer dedikert til fremdrift per tur. Her må det altså forbrukes av sikkerhetsmarginen på 1 350 kilowattimer. Dette resulterer i et nettoforbruk 150 kilowattimer mer enn dedikert energi og sikkerhetsmargin til egen drift. I dette scenariet finnes det flere løsninger som kan anvendes:

- Gå i en saktere fart for å redusere energiforbruket, men risikere forsinkelser i timeplanen.
- Lade fra kai i Geiranger om energi er tilgjengelig.
- Starte dieselmotor for å gå med hybrid fremdrift. Skipet er ikke underlagt nullutslippskravet, og kan lovlig bruke dieselmotor til fremdrift om driftprofilen krever det.

- Bruke energi fra andelen dedikert til lading av passasjerbåter. Det kan spekuleres i at færre passasjerbåter vil gå på dager med slike værforhold.

Skipets dieselgenerator kan fungere som et ekstra energilager. Med skipets dieseltank på 500 liter og motorens spesifikke forbruk på 210 gram per kilowattimer [80] gir den et teoretisk energilager på 2 000 kilowattimer. I hybrid drift med ekstremtilfellet som krever 500 kilowatt til fremdrift, kan 300 kilowatt forsynes fra generatoren og 200 kilowatt fra svinghjulene. Det vil da være nok diesel til 6,7 timer fremdrift, som vil være tilstrekkelig til all transit. Generatoren medfører at bare 1 400 kilowattimer med elektrisk energi fra svinghjulene brukes til fremdrift. På denne måten blir heller ingen av energien fra sikkerhetsmarginen forbrukt.

Det kan argumenteres for å legge til flere energilagringseenheter. Dette ville vært en løsning som tillot fartøyet å fortsette med fullelektrisk drift uansett værkondisjon. Med tanke på kostnad ble det avgjort å minimere mengden svinghjul, og kunne dekke det resterende energibehovet med dieselgeneratoren for hybrid drift i ekstremtilfeller. Fartøyet vil normalt kunne betjenes som fullelektrisk, men bruke hybriddrift i ekstreme situasjoner med større energibehov for fremdrift.

16.4 Fremgangsmåte

Grunnet få sammenlignbare skip ble en grundig bottom-up metode lagt til grunn. Metoden er risikabel og krever mye arbeid. På tross av et grundig stykke arbeid er ikke resultatene tilgjengelige før prosjekteringen er i slutfasen. Dette medførte at krevende valg i tidlig fase ble vanskelig å reversere senere i arbeidet.

Da bottom-up lå til grunn ble det lagt lite arbeid i å framkalle statistikk og veiledende størrelser av tilsvarende skip. Dette var en avgjørelse basert på at få eksisterende skip med tilsvarende bruk var kjent. Derfor var konklusjonen at et forsøk på statistikk ville gi like mye misvisende tall, som veiledende. I ettertid har utfordringer relatert til skrogformen og strukturen, vist at bedre statistisk grunnlag burde vært til stede. Eksempler på dette er typiske forhold mellom enkeltskrog og tunnelbredde for katamaraner.

Ved å designe bottom-up vektlegges innovasjon i stor grad. Om prosjekteringen skal gjennomføres fra bunnen av, bør intensjonen være innovasjon. I dette tilfellet har nye løsninger for energifrakt blitt innover. Det er derimot vanskelig å bekrefte at løsningene som er skapt er tilstrekkelige og praktisk nyttige.

Designmetoden som ble fulgt var hovedsaklig designspiralen. Første runde ble gjennomført uten fokus på detaljer tidlig i arbeidet, for å bli kjent med aktuell problemstilling. Data fra sommerprosjektet ble benyttet som utgangspunkt. På dette stadiet ble også David Andrews moderne metode fulgt, og kriterier for videre arbeid ble fastsatt. Fokuset omhandlet stilmessige valg, funn av utrustning og regler for beslutningstaking igjennom arbeidet. Etter dette ble to runder gjennomført med økende detaljnivå. Det er resultatene fra den

siste runden som hovedsaklig er lagt frem i rapporten.

16.5 Skrogform

Valget av skrogtype ble gjort i en veldig tidlig fase av arbeidet basert på kravene til energilagringseenhetene. Den potensielle utfordringen med svinghjulenes tap av rotasjonsenergi opp mot skipets krenkning var kjent fra tidlig av, og kunne løses med en høy GM-verdi. Et stort dekkfotavtrykk som holdt en lengde under 24 meter LOA ville også kreve et skrog med stor bredde for å ikke måtte stable energilagringseenheter i høyden. Med helelektrisk fremdrift var også reduksjon av skrogmotstand en prioritet. Med alle krav samlet ble det besluttet å bruke et katamaranskrog fremfor monohull.

Det var antatt kapasitet av energilagringseenheter fra rapporten til Grønn Kai prosjektet på 56 enheter [3]. Med dette ble hoveddimensjonene på 23,9 meter LOA og bredde på 8 meter valgt for katamaran. Det ble gjort en sammenligning med et design av monohull som kunne følge samme krav til kapasitet og installasjon. For å kunne gi prosjektet slingringsmonn i antall energilagringseenheter ble det satt et krav til skalerbarhet. Det å skalere et monohull med allerede en maksimal lengde vil bety å skalere ut i bredden, som ville drastisk senket L/B-forholdet og økt skrogmotstand. Dette ville krevd flere energilagringseenheter til fremdrift. Flere enheter ville videre økt vekt og kostnad. Å skalere katamaranen ville bety å øke totalbredden uten å måtte øke vannlinjebredden, med små variasjoner i dypgang.

Et annet behov til energilagringseenhetene relatert til stabilitet var et krav til kabelganger på undersiden av enhetene. Dette førte til at volumet tatt opp av enhetene og omringede systemer ble flyttet opp i høyden. Endringen påvirker fartøyets tyngdepunkt og stabilitet. I tillegg var det nødvendig med dobbelbunn, som økte tyngdepunktet med en fast avstand uansett skrog og utforming. Selv ved høy VCG, vil katamaranskrogets gode KM-verdi bevare skipets stabilitet. Et monohull anses som et mer risikabelt valg som følge av mindre formstabilitet. Med et valg av monohull er det sannsynlig at bredden på skroget også ville måtte økes på grunn av stabilitet, og videre øke motstand og energiforbruk. Disse konsekvensene var ønsket å unngå.

Som en ekstra veiledning til valg av skrogtype, ble diagrammet i Figur 5.9 fra DMS Marine Consultant [51] brukt basert på dødvektskoeffisient. Denne koeffisienten er basert på skipets totaldeplasement og dødvekt. Et definisjonsspørsmål ble da hva som defineres som dødvekt. I dette tilfellet blir energilagringseenhetene tellende som lettvekt, ballasttanker behandlet som void, og drivstofftanken av ubetydelig størrelse. Dermed kan dødvektskoeffisienten tydes til å være 0,0 om det ikke finnes dødvekt.

Med valget av katamaran ble de vanlige spørsmålene om katamaraners negative sider diskutert, som tverrskipsstyrke og produksjonskostnad. Fartøy av en så liten størrelse for et rolig farvann har ingen spesifikke krav om styrke mot splittmoment, og den interne strukturen av fartøyet ville likevel gi skipet gode egenskaper i tverrskipsstivhet. Produk-

sjonskostnaden for en katamaran sammenlignet med monohull ble sett på som lite relevant sammenlignet med kostnaden av energilagringseenhetene som tidlig i prosjektet var estimert å ta over 60 % av total kostnaden.

Gjennom prosjektet ga det store dekkfotavtrykket til katamaranen mange fordeler i plassering av systemer og intern utforming. Fartøyet beholdt sin skalerbarhet til avslutningen av prosjekteringen. Generelt resulterte det i et fartøy med romslig arbeidsplass rundt energilagringseenhetene. Til sammenlikning med monohull hvor dette var forventet å bli vesentlig mindre romslig i tillegg til andre nevnte konsekvenser denne skrogformen kan medføre.

Etter det ble utført praktisk slepeforsøk av skroget ble det påvist en utfordring med skrogets form, som følge av bredden mellom enkeltskrogene. Hvert enkeltskrog hadde en egen bredde på 3 meter og en symmetrisk utforming. Avstanden mellom skrogene var på 2 meter. Med en så smal tunnel mellom skrogene ble det tydelige hydrodynamiske utfordringer som tydet på at skroget ville hatt en fordel av en bredere tunnel. Dette kunne også gitt mer plass til potensielle energilagringseenheter eller andre systemer over tunnelen. Det ble erfart at minimum tunnelbredde burde tilsvare bredden av et enkeltskrog eller mer.

Refleksjon rundt skrogutformingen senere i prosjektet, avklarte at katamaranens hoveddimensjoner ble gjort på et grunnlag med for lite faglitteratur og begrunnelser. Det var generelt utfordrene å finne eksisterende eksempler på skrog og fagstoff om deplasementkatamaraner som kunne brukes til grunnlag. Av deplasementkatamaraner som eksisterer, var det også vanskelig å se sammenhengen mellom disse skrogene og denne anvendelsen på dette stadiet.

Initialt ble baugene utformet uten bulb, men etter slepeforsøk med bulb ble det besluttet å oppdatere modellen, tegninger og analyser til bulbversjonen. Av andre endringer gjort på skroget underveis ble akterendene endret med mer volum for å forflytte LCB lenger akterlig for bedre trimming og bølgerespons. Den initielle skrogformen og linjene ble ellers lite endret fra første konsept, som hadde slanke enkeltskrog med relativt lav blokkoeffisient. Valget av katamaran som skrogtype ble med dette sett på som det riktige valget fremfor monohull.

16.6 Materialvalg

Materialvalget ble sterkt vektlagt i tidlig fase av prosjektet. Den innledende tanken var å bruke karbonfiber som konstruksjonsmateriale. Den manglende kompetansen om mer komplekse metoder for styrkeberegning gjorde dette materialet mindre attraktivt og derfor ble aluminium vurdert. Et alternativ som ble vurdert underveis var en hybrid løsning med karbonskrog og indre bæring til svinghjulene i stål. Dette ble også forkastet.

Stål ble utelukket da intensjonen var å redusere vekt og dypgang. Likevel er materialet fordelaktig på sitt vis med lavere kostnader og større styrke. Det ble også erfart at energi-

lageret selv har en totalvekt om lag det dobbelte av skrogvekten når aluminium lå til grunn. Fra dette perspektivet bør det vurderes om et lettere skrog egentlig hadde utgjort noen forskjell.

Aluminium-5086 ble brukt som legering etter en undersøkelse av typiske legringer i aluminium og kontroll av egenskaper i DNVs regelverk. Legeringen er typisk brukt i aluminiumsskrog og er enkelt å bearbeide i produksjon. Likevel ble det ikke undersøkt andre alternativer og andre legeringer med tilsvarende egenskaper kunne vært like aktuelt. Det var ikke ønsket å studere dette fagområdet i større dybde, og for enkelhets skyld ble derfor denne legeringen valgt og brukt videre.

Skroget ble prosjektert i aluminium og andre materialer til opplagring ble forkastet. Overbygget ble også prosjektert med aluminium i vegger og gulv. De beskyttende skallene ble derimot valgt til å være lagd av glassfiberkompositt. Både skallene i front, akter og over broen. En sandwich med et skum i mellom to lag glassfiber ble brukt. Årsaken til dette er at materialet har en betraktelig lavere vekt enn aluminium, og kompositter tillater enklere produksjon av dynamiske og kompliserte former. I ren glassfiber hadde disse skallene blitt svært tunge, og en kjerne i lett skum ble derfor valgt. Det ble ikke gjort noen analyse av skallenes bæring, men antatt at de var i stand til bære sin egenvekt uten ekstra støtte. Karbonfiber ble også vurdert, men vektsbesparelsen var minimal og prisen ville økt betraktelig.

16.7 Propulsjonsløsning

En propulsjonsløsning med to elektriske roterbare thruster og to stykk elektriske baugthruster vil ikke være billigste mulig løsning, men har vist seg å være svært aktuell til applikasjoner hvor manøvrerbarhet er viktig. Samtidig settes det et krav til at et autonomt fartøy bør kunne ha en manøvreringsløsning som tillater å yte skyvkraft i et stort utvalg av retninger, som bare kan gjøres med systemer som roterbare thruster eller vannjet. Derfor ble den nåværende løsningen valgt, og sett på som eneste logiske alternativ for et skip med slike krav.

Skip med et propulsjonssystem som består av to symmetriske drivlinjer til propulsjonseenheter, vil ideelt sett isolere de to systemene fra hverandre og ha individuelle styringssystemer og energitilførsel som drivstoff og strøm. På denne måten kan redundans sikres om en del i ene drivlinjen skulle feile. Det vil ikke påvirke den andre drivlinjen, og fartøyet kan fortsatt ha en redusert grad av fremdrift og manøvreringsevne. I dette fartøyet vil det samme gjelde i at hver thruster vil hente energi fra energilagringseenhetene individuelt og styres individuelt.

Om fartøyet skulle drives på bare en thruster med halvert potensiell effekt, vil det fortsatt kunne yte 250 kilowatt inngangseffekt på motoren, når skipet totalt trenger 172 kilowatt inngangseffekt for å holde 8 knop. Om all propulsjon skal skje på bare én thruster vil propellens virkning antakeligvis være redusert. Fartøyet vil heller ikke kunne bevege seg

i en rett linje, men retningen på fartøyet, heading, vil være annerledes enn kursen, COG, som kan forårsake mer motstand.

Selv om skipet kan antas å kunne driftes på bare en motor, er det ikke en driftssituasjon som det kan opereres med over tid. Det må i så fall bare være for å fullføre døgnets oppdrag før det kan oppsøke reparasjon. For å virkelig lage en redundant og driftsikker infrastruktur basert på elektrisk energifrakt over sjøen, kan det antas at det vil kreve to stykk av fartøyet.

16.8 Visuelt design

Det visuelle aspektet av designet ble sterkt vektlagt i prosessen ved fartøyets utforming. Det endelige estetiske designet anses som et vellykket design som følger designkriteriene godt. Skallene på eksteriøret av overbygget har holdt seg funksjonelt separert fra skipets systemer, og påvirker dermed få funksjoner. Skallene og skrogformen utgjør alene det visuelle uttrykket, og kan på et vis sees på som et eget system som hovedsaklig tjener et estetisk formål.

En ulempe med skallenes utforming er i form av utsikt fra broen og tilkomst rundt det ytre hoveddekket. Sideskallene reduserer sikt fra styreposisjonen og gir rundt 100° synsfelt til hver side. Det er heller ingen tilgang fra ene dekkssiden til den andre siden på hoveddekket. Mannskapet må dermed bevege seg gjennom styrhuset for å komme seg fra den ene siden av dekket til den andre. Det er ingen kjente krav som hindrer dette i å være et alternativ, men i praktiske situasjoner vil det være hensiktsmessige med flere tilkomstmetoder mellom dekkssidene. En løsning som kunne gjort dette mulig, hadde vært å integrere trappesteg inn i skallet bak styrhuset sammen med et rekkverk, som lot mannskap passere over skallet fra ene siden av hoveddekket til den andre.

16.9 GA

Katamaranskroget har gitt fartøyet et stort dekkfotavtrykk som gir god plass til skipets systemer. Energilagringssystemene er plassert høyt for å gi god tilgang under enhetene for kabling og vedlikehold. Dette har hevet tyngdepunktet, men fartøyet er fortsatt svært stabilt grunnet skrogformen. Enhetene plassert langs yttersidene av skroget kunne vært plassert litt lavere uten å ta vekk nødvendig tilkomst og volum. Med nåværende design trengs ikke dette.

For å vinne mer volum i skrogets interiør, og samtidig senke tyngdepunktet, er det mulig å senke tanktoppens høyde. Da kan alle systemene som energilagringssystemene i ytre del av skrogene plasseres lavere. Ballasttankene er implementert hovedsaklig for å danne en dobbelbunn. I praksis blir tankene betegnet som void.

Resultatene fra slepeforsøket bekreftet skrogets motstand, krav til motoreffekt og energi

satt av til egen fremdrift. Det ble påvist at mengde energilagringseenheter kunne reduseres fra 60 til 54. Dette vil redusere prisen og vekten av fartøyet, og fortsatt gi nok energi til å møte krav til driftsprofil med sikkerhetsmargin. Når seks enheter kunne fjernes ble det valgt å ta ut enhetene mellom spant 3 til 7 over tunnel. Med dette kunne det gjøres små endringer for å danne et nytt lukket rom som grenset til teknisk rom under styrhuset. Dette gav 18,8 kubikkmeter med ekstra rom til generator og kjølesystemer. Lokasjonen til kjølesystemet tillater en enkel kjøleløsning hvor luftkjølt radiator kan plasseres direkte over rommet under bakre skall av skipet.

Plassering av generator i et eget rom gir flere fordeler relatert til drift og sikkerhet. Et generatorrom som har avgrensning til eksteriøret av skipet gir god tilgang til systemer som luftinntak. Teknisk rom foran generatorrommet fungerer som gjennomgang mellom styrhuset og nedre skrog. Det rommer elektriske tavler og dieseltanken. Med generatoren i et separat rom fra drivstofftanken og andre brannfarlige system som elektriske tavler, vil en brannmur mellom rommene forbedre brannsikkerheten ombord. Teknisk rom skal likevel ansees som et risikabelt område under en brann, på samme måte som et generatorrom. Når generatorrommet kan defineres som et maskinrom, blir det også lettere å forholde seg til regelverk for spesifikke romtyper.

16.10 Slepemotstand

Bruken av empiriske modeller i den tidlige delen av designfasen ga varierte resultater. Det ble undersøkt metodenes egnede anvendelser og bekreftet at disse skulle være egnet. Brukermanualen for Maxsurf Resistance ble brukt til veiledning for valg av empirisk modell. Slender Body metoden ble undersøkt hvor kriteriene for Froudetall burde ligge mellom 0 og 1. Med hastighetene planlagt fra driftsprofilen var dette innenfor 0 til 0,4. Slenderness Ratio var også et kriterie, hvor anbefalte verdier burde ligge over 4. Slenderness Ratio ble beregnet til 4,7 for det endelige skrogdesignet. I tidligere fase var denne verdien noe lavere [81].

Slender Body Method viste seg å være svært sensitiv for Froudetall og bølgepåvirkning. Den lille endringen i lengde mellom de to versjonene viser seg å ha et stort utslag på motstanden. Resultatene viste store innslag av bølgedannelser, og effektbehovet i ulike hastigheter varierer mye. Denne bølgepåvirkede kurven gjorde det svært utfordrende å bruke resultatet i pålitelige beregninger.

Holtrops metode var basert på L/B forhold og Froudetall. Ulempen med metoden er det underliggende datasettet den er sammensatt av. Metoden er ikke egnet til mindre skip, og heller ikke katamaraner. Derfor var det ugunstig å legge frem resultater med denne metoden. Det er også anbefalt å forholde seg i intervallet mellom 3,9 og 15 i L/B forhold. Litt avhengig av hva som betraktes som katamaranens bredde var det uansett under dette. Disse erfaringene medførte at Holtrops metode ble utelukket.

Slepeforsøket ble rigget til med de to aktuelle modellene. ITTC spesifiserer en fast pro-

sedyre for overflatebehandling og bruk av riktig sandpapir for optimale resultater. Dette ble ikke fulgt og XPS-materialet ble kun pusset jevnt i overflaten før testingen [82]. For å skape ekstra appendix-motstander ble thruster-tunnel og thrustere lagd i modellskala og festet til modellen. Antisklitape ble også festet i baugen som turbulensstimulator. Om denne tapen var av betydning er usikkert. Siden modellen var av stor skala ble det større bevegelser i vannet selv i små hastigheter. Stripene med tape kan derfor ha vært overflødige og heller gitt mer motstand enn reelt.

Sammenlikningen mellom de to modellene viste gevinster av å ha en bulb. Største besparelser ble registrert i 8 knop hvor bulben reduserte den totale motstanden med 15 %. Siden dette var hastigheten med mest besparelse fra bulben ble dette videreført som optimal marsjfart. Basert på det visuelle skapte bulben en mye renere strømming i forskipet. Denne rene brytningen krevde antakelig mindre energi enn den kaotiske baugbølgen observert uten bulben. En forlengelse av vannlinjen ga også skroget et litt lavere Froudetall.

Besparelsen i 8 knop kan også være hastigheten hvor bølgedannelsene i helhet samsvarer med skipets lengde mest ideelt. Om baug og hekkbølger samsvarer godt vil dette redusere bølgemotstanden betydelig i større hastigheter og skroget vil generere lite bølger. Her kan bulben ha bidratt med å generere en større og bedre plassert baugbølge, som i det totale bildet resulterer i en motstandsreduksjon.

På tross av store besparelser med bulben ble det observert en økning i motstand i lave hastigheter. I 6 knop ble det målt 9 % høyere motstand for modellen med bulb. Basert på bilder tatt under forsøket fremkommer det at hastigheten er svært lite egnet for bulben. Bildene viser at baugbølgen bare klatrer delvis opp på bulben. Dette genererer en baugbølge veldig langt forran resten av skroget, og innen bølgen møter dannelsene lengre bak slås de sammen og gir store utslag. Derfor må det vurderes om bulben skal være til stede i applikasjoner hvor denne hastigheten skal holdes ofte. Bilder fra slepeforsøk er fremstilt i Vedlegg H.

Andre feilkilder i modellforsøket kan ha forekommet fra databehandlingen. Fra hver måling ble det manuelt fremkalt en gjennomsnittlig måling fra lastcellen. Det ble forsøkt å være konsekvent for hver test slik at alle målinger var basert på tilnærmet like store datasett. Lastcellen er også svært preget av støy, og dette ble forsøkt å gjøre noe med. Første tiltak var kalibrering av lastcellen før testen. I tillegg ble det gjort et lite fratreck i hver måling av støyet som ble registrert i stillestående tilstand før slepet ble startet.

Modellen ble også fuktig i løpet av testingen som både endret vekten og overflaten på skumaterialet. Dette kan ha gjort at de første testene ble registrert med en mer ru overflate enn de siste testene som ble gjennomført. Hvilke effekter dette har hatt ble ikke videre undersøkt.

Skalaen på modellen var valgt til å være stor for å få presise målinger. Dette ga effekt. Intensjonen var å få nok motstand målt på lastcellen slik at restmotstanden var en positiv verdi etter at friksjonsleddet ble fratreckt. Dette ble oppnådd, og fremkommer i Vedlegg

H. Likevel ble det ikke undersøkt i forkant hvordan tankens størrelse begrenser hva som er ideell størrelse på modellen. Basert på bilder og video fra testingen er det tydelig at store vannmengder “dyttes” forran modellen igjennom slepet, og at baugbølgene treffer kanten av tanken før hele modellens lengde hadde passert. Bølger som returnerte fra veggen traff modellen igjen og medførte kaotisk bølgemønster i lave hastigheter. Dette gir ikke korrekt inntrykk i forhold til virkelig skala.

Disse blockage-effektene ble undersøkt ytterligere i ettertid. Fra ITTC ble tre korreksjonsmetoder for hastighetsendring anbefalt. Schuster og Tamura-metodene ble brukt til å beregne hvilken korreksjon i hastigheten som trengtes for å få riktige tall på tross av en smal og grunn slepetank. Beregningene var baserte på målene til slepetanken og aktuell data fra modellen. Funnene indikerte at hastighetene skulle vært korrigert med 2 % - 3 %. Siden disse korreksjonene var relativt lave ble ikke dette undersøkt videre. Dette kan komme av korreksjonsmodellenes bakgrunn, og at de er utviklet for å gjelde i større tanker. En konservativ margin på 15 % var allerede lagt til målingene for å ha marginer i beregningen til driftsprofilen. Dette tillegget eliminerer hastighetskorreksjonene og derfor ble de ikke lagt til grunn i resultatene. Korreksjonsberegningene finnes i Vedlegg H.

16.11 Vekt og stabilitet

Første hydrostatikkanalyse i Maxsurf Stabiliy Advanced resulterte med stor akterlige trim. Energilagringenhetene utgjør majoriteten av vekten og er spredt jevnt utover fartøyet, men enkelte store vekter som styrhuset er plassert mer akterlig, og bidrog til en kortere LCG. Hovedårsaken antas å være utforming av akterenden som hadde lite volum under vannlinje, og bidro til en LCB plassert langt frem i fartøyet. Samtidig som den første hydrostatiske analysen ble utført, ble første sjødyktighetsanalyse utført i Maxsurf Motions Advanced. Begge analyser konkluderte med at mer volum i akterenden under vannlinjen ville både redusere trimming og stampebevegelse når skipet får innkommende bølger.

Akterendens utforming ble endret for å legge mer volum under vannlinjen, som ga en betydelig bedre stampebevegelse. I tillegg ga det en bedre form på undersiden av skroget til innstrømming for propellene. Endringen av volum ville fortsatt ikke legge fartøyet på even keel. Det ble besluttet å legge inn fast ballast i baugen av fartøyet foran kollisjonsskottet. Det enkleste valget av material for fast ballast er å bruke betong. 1,54 kubikkmeter betong i hver baug legger skipet på even keel. Det tilsvarer totalt 6,8 tonn i fast ballast.

Stabiliteten til fartøyet ga lite utfordringer og falt godt innenfor alle marginer til regelverk, selv under krav som fartøyet ikke er pålagt å følge. Alle kriterier som er automatisk kontrollert gjennom Maxsurf Stability Advanced har også blitt kontrollert manuelt i DNV sine regelverk, samt HSC kode 2000.

16.12 Seakeeping

Analysen av skrogets egenskaper ble gjort på begrenset kompetansegrunnlag. Opprinnelig var intensjonen å undersøke skrogets oppførsel i ulike sjøkondisjoner. Usikkerhet rundt hva som skulle innføres som karakteristisk bølgehøyde og periode medførte at analysene ble utsatt. I sluttfasen ble en bølgehøyde fastsatt for å uthente resultater, men det var utfordrende å vurdere om gode kondisjoner var valgt.

Underveis i prosjektet ble også energilagrenes egenskaper belyst, og det ble vurdert om disse kunne ha innvirkning på skipets bevegelser. Dette ble antatt da fartøyet er relativt lite, og mengden roterende masser om bord er svært stor. En interessant analyse hadde vært om presesjon endret skrogbevegelse. Og om det potensielt omsatte rullebevegelser fra sideveis bølger til stamping. I denne sammenhengen skulle tap og akselerasjoner undersøkt nærmere, men det var uklart hva Spinning Energys enheter tålte og ikke. Derfor ble det ikke undersøkt ytterligere. Hvilke tap som oppstår i svinghjulene med ulike sjøkondisjoner bør gjennomføres for å bekrefte at energilageret er stort nok. Fartsområdets vær og vind kan endre dette.

Konklusjonen ble at en analyse av skrogets egenskaper var mulig, og dette resulterte i endringer av skrogform. All analyse relatert til svinghjul på skip ble ikke fulgt opp videre. Det er likevel viktig å presisere at det trengs mer forskning og utvikling før en energifrakter som dette kan sjøsettes. Om store bevegelser innfører større tap vil dette ha innvirkning på den nyttige energitettheten, og batterier vil trolig være mer gunstige.

16.13 Struktur og styrke

Innledningsvis ble regelverk studert og det ble klart at katamaranskroget krevde klassen HSLC i regelverket. Rent praktisk var dette en konsekvens av de ekstra strukturkravene som trengs når skroget er todelt med en tunnel i mellom og konstruksjonsmaterialet. Utenom skrogformen og materialet var det lite som tydet på at HSLC var mer passende enn generelt regelverk for skip. Skipet skal hverken gå i høye hastigheter eller være av lav vekt. Klassekravene var derfor en konsekvens av skrogets form. Hastigheten og størrelsen på skipet har også innvirkning på hva som må oppfylles. Om $\frac{V}{\sqrt{L}}$ er under 3, kreves det lite ekstra struktur for slamming og landinger på, eller mellom bølgetopper, såkalte *crest og hollow landings*.

Skrogets lengde var også holdt lav for å tilfalle krav til D6. Dette ga innledende skrogform et svært lavt L/D-forhold. Dette indikerer ofte små langskips momenter og et relativt høyt motstandsmoment. Skipet er også langt under lengder som generelt sett forbindes med et behov for ekstra avstivning langskips. Derfor ble det kjent at plater og stivere i hovedsak ville bli dimensjonert av regelverkets minimumskrav i større grad en behov for styrke.

Første runde styrkeberegning ble derfor gjort i Nauticus Hull med intensjonen om å finne

minimumskravene og hvilke spenninger det resulterte i. Det ble beregnet spenninger i området 5 - 10 MPa i topp og bunn. Derfor var det lite som tydet på at dimensjoneringene måtte endres i stor grad videre i arbeidet som følge av endringer på skroget. Vektene denne strukturanalysen ga ble videreført inn i vekt- og stabilitetsberegningene. Det ble også estimert en vekt på bærersystemet som tillot videre arbeid. Med disse tallene var total skrogvekt godt estimert og modellforsøket hadde en egnet dypgang å gjennomføres på.

Videre ble styrke utsatt som følge av modellforsøket og ekstra analyser det medførte. Basert på funnene om behov for minimums-dimensjoner var det heller ikke forventet at strukturanalysen krevde stort fokus. Når et endelig design var utarbeidet ble derfor de innledende verdiene brukt med kun små endringer. Denne runden innebar total gjennomgang av globale og lokale elementer. En runde til med strukturanalyser kunne gitt godt utbytte med vektsbeparelser. For globale momenter langskips benyttes bjelketeori fra Euler-Bernoullis teori. Et premiss for disse metodene er forholdet mellom bjelkens lengde og tykkelse som bør være i en størrelsesorden av 20 eller høyere. Dette kan ha medført avvik i spenningsberegningene.

Den valgte stiveravstanden ble 400 millimeter og bærerrammene ble plassert 2000 millimeter fra hverandre. Rent teoretisk gir dette god nok struktur, men i løpet av strukturanalysen ble det erfart at små skip i aluminium ofte benytter mindre mål. En konsekvens av dette var dimensjonene krevd for å ha tilstrekkelig bærerstyrke. Steget på bærerprofilene langs skutesidene måtte gå 1200 millimeter inn i rommet, noe som er langt over det ideelle. Et mye mindre steg ville vært strekt nok mot spenninger, men for stegbuling var det ikke tilstrekkelig. Tykkelsen på flere av rammene ble også svært store. Det foreslås tiltak mot dette ved å halvere stiverbredden og avstanden mellom bærerrammene til respektive 200 millimeter og 1000 millimeter.

Større avstander mellom stivere og bærere ble først antatt da det var forventet dette ville spare mest vekt. Det er derimot usikkert om dette faktisk ble oppnådd med tanke på dimensjonene som ble valgt. Det er godt mulig flere stivere og bærere hadde spart vekt da alle dimensjoner kunne blitt redusert betraktelig.

Rent praktisk med disse strukturelementene er det ikke samsvar med alle tekniske løsninger. Med bærerrammer hver 2000 millimeter er det ikke helt korrekt at hyllene til svinghjulene henger sammen for 6 meter. Størrelsene på rammene vil kreve at svinghjulshyllene deles inn hver andre meter. Luker i dekk og andre gjennomføringer er heller ikke tatt høyde for rent praktisk med stivere. I den globale analysen ble utkappene til dekksluker i det kritiske snittet tatt med for å hindre kunstig høyt motstandsmoment. Stivere og bærere må likevel være til stede, og de store langsgående lukene til modulær drift samsvarer ikke helt med dette. I praksis må nok antall luker reduseres og strukturen legges opp litt ulikt for dette.

Bulekontrollen av platefeltene i topp og bunn ble forenklet til å bare gjelde disse platefeltene. Bulekontroll av platefelt i sider og tunnel ble ikke gjort. Avgjørelsen om å forenkles

dette var basert på at platefelt med største spenninger var viktigst å undersøke. Likevel burde nok sider og tunnel blitt undersøkt da disse platefeltene får ikke-lineære spenninger som gir andre bulecoeffisienter og derfor reduserer bulekapasiteten. Derfor er ikke denne kontrollen helt tilstrekkelig. Tidsbegrensninger tillot ikke videre arbeid med dette.

Tverrrskipsmomentet ble beregnet uten at regelverket egentlig krever det. Kravet om struktur over tunnelen gjelder kun skip med $\frac{V}{L}$ større enn 3. Derfor ble dette kun gjennomført for å undersøke hvilke spenninger dette vil gi. Som forventet ble de resulterende spennin-
gene veldig lave med det dimensjonerende momentet fra regelverket. Det dimensjonerende momentet var relativt lavt som følge av en smal tunnel. Metoden som ble brukt var nok en gang basert på bjelketori hvor tverrsnittet ble tegnet i 1:1 skala i AutoCAD og annet arealmoment ble hentet ut. Om metoden er ideell er usikkert.

Innfestingssystemet til svinghjulene var basert på antakelser om at de ble boltet fast i hvert hjørne. Derfor ble det modellert i 3D-Beam en kryssturktur i hvert svinghjul hvor lasten ble lagt i krysningspunktet. De diagonale bjelkene vil da tilsvare avstanden fra senter av last og vrिमoment ut til hvert festepunkt i modulenes fire hjørner. Om de ska boltes, limes eller sveises fast er ukjent.

Lasten påført var basert på egenvekten til hver modul med en dynamikkfaktor, og vrिमomentet. Vrिमomentet ble beregnet basert på C-ratens minimale ladetid og hvilke resulterende akselerasjoner dette ville gi. Ingen av tallene kan bekreftes at stemmer overens med de faktiske svinghjulene, og annen dimensjonering av systemet kan være nødvendig. Rotasjonsretning og faktiske masser var heller ikke kjent i detalj. Likevel var det viktig å gjøre en grunnleggende kontroll av dette for å ha et estimat på hva vektene til denne bæringen ville være.

16.14 Kostnadskalkyle

Det tas forbehold om at majoriteten av beløpene i analysen var basert på antakelser, tilsvarende komponenter og lignende. Derfor er analysen kun til veiledning, og ikke gjeldende som eksakt pris. Beregningen danner likevel grunnlaget for prosjektets helhetlige økonomiske tyngde. Om prosjektet skal realiseres er dette også en god plattform for å beregne pris mer eksakt da korrekte verdier enkelt kan benyttes.

Innkjøpskostnaden av enkeltkomponenter er estimert ut fra oppgitte priser av leverandører. Ekstrakostnadene som frakt, installasjonsarbeid, støttesystemer, og installasjonskomponenter gjør den totale kostnaden per komponent eller system, mer utfordrene å estimere nøyaktig. Derfor må det summeres opp antagelser fra alle kostnadspostene relatert til hvert system som sammenlagt kan gi et prisestimat. Det måtte også gjøres sammenligninger av eksisterende fartøyers verdi med lignende systemer, størrelse, og materialer for å sammenligne totalpriser som en veiledning.

Det er stor usikkerhet rundt kostnadene til både skrogkonstruksjonen og komponentene.

Skrogets verdi er basert på materialkostnader som varierer, og en andel arbeidskraft som kan variere i kostnad utifra hvor og hvem som produserer skroget. Markedsprisene på både skrogkonstruksjon og komponenter styres av etterspørsel og råvarer.

Energilagringseenhetene fra Spinning Energy utgjør over $2/3$ av skipets totale kostnad. Dette er fordi teknologien bak langvarig svinghjulsenergilagring er fortsatt i en tidlig fase med dyre produksjons- og utviklingskostnader. Om markedet for svinghjulsenergilagring vokser vil prisene kunne potensielt senkes drastisk. Det kan sammenlignes med andre typer teknologi, for eksempel batteri, som har hatt stor vekst i markedet de siste årene og derfor opplevd en prisreduksjon. Det kan spekuleres i at svinghjulsenergilagring kan oppleve en lignende prisnedgang om det blir en trend i energilagringmarkedet. I et slikt tilfelle kan det antas at prisen per enhet senkes om noen år frem i tid. Dette vil kunne senke prisen på skipet drastisk og gjøre konseptet mer attraktivt.

17 Endelig konsept

Hoveddimensjoner:

L_{OA}	23.95 m
L_{pp}	20,55 m
B	8 m
B_{wl}	6 m
T_{design}	1.5 m
D	4 m
C_b	0,64
LW_t	130,9 tonn
DW_t	0,5 tonn
V_{cruise}	8 kn
V_{max}	10 kn
$Range$	604 nm



Figur 17.1: Kinetic Carrier One: DNV-HSLC Cargo R4 Zero Emission

Kinetic Carrier One er et energilagringsskib som frakter elektrisk energi lagret i mekaniske svinghjul. Ved å lagre energien kinetisk, sikres prosjektets mål om bærekraft. Svinghjul i karbonkompositt har lang levetid og et livsløp med lavere klimautslipp enn litium-ionbatterier. Skibet bruker energi fra energilageret til å gå fullelektrisk, og er designet for å kunne konverteres til autonom drift i fremtiden.

Skipet er prosjektert som en del av Grønn Kai-prosjektet av NTNU, og skal gå i Storfjorden og Geirangerfjorden. Innen år 2026 er det krav om at alle passasjerfartøyer som går i verdensarvfjordene skal være utslippsfrie, og Kinetic Carrier One skal supplere med elektrisk energi til lading av elektrisk infrastruktur.

Fartøyet er lagd for å lades over natten på fergekaien ved Linge, og deretter seile til Geiranger på dagtid for å fungere som mobilt energilager. Skipet vil fungere som en del av infrastrukturen i Storfjorden som utnyttes av turistindustrien. Det estetisk visuelle designet er tilpasset fjordlandskapet.

TEKNISKE EGENSKAPER

Drivlinje	Energilager	Mannskap
2x 50 kW Baugthruster	FESS - 13 500 kWh	Matros og Styrman (D6 sertifikat)
2x 250 kW Hovedthruster 300 kW Diesel Motor og generator	54 enheter Spinning Energy C rate = 10 U = 1000 V	Mannskapsfasiliteter: - Bysse, salong, og toalett

18 Konklusjon

Med et behov for alternativ til distribusjon av energi har det blitt prosjektert en energifrakter for å imøtekomme behovene som oppstår i Geiranger ved fremtidig elektrifisering. Det er undersøkt om svinghjul har potensiale for å lagre energi ombord på skip, og belyst nye problemstillinger dette vil medføre.

Et skip med 13,5 megawatttime energilager vil dekke turistbåtenes behov for energi, driftes med nullutslipp og forsikre bærekraftig strømforsyning til Geiranger. Det er lagt grundige analyser til grunn, og skrogets utforming sikrer et effektivt system uten uegnede tap. Arbeidet har resultert i en visuelt attraktiv katamaran med modulær oppbygning. Kjente designmetoder er brukt for å komme frem til det endelige designet, og det er benyttet relevant fagstoff for å løse aktuelle utfordringer.

Teknisk dokumentasjon og krav i henhold til bransjens standard er produsert, og vedlagt. Fra det tekniske ståstedet oppgaven er løst fra, er svinghjul en ideell energibærer. Svinghjul har tillatt et kompakt design under 24 meters lengde, og kan håndtere rask energioverføring på høy effekt. Fartøyet er allsidig og tilrettelagt komfortabelt arbeid.

Praktisk testing og moderne programvare har kvalitetssikret arbeidet i stor grad. Testforsøk i slepetanken har bevist at skrogets bulb har høy effekt. Moderne programvare har også forsikret stabilitet og struktur etter gjeldene krav og regler. Det kan med dette konkluderes at en energifrakter vil kunne imøtekomme problemet med energimangel, og at gjeldende design er et konsept som beviser dette.

19 Videre Arbeid

Underveis i arbeidet har nye utfordringer blitt belyst. På grunn av oppgavens begrensninger har ikke dette latt seg gjennomføre, og dette har gitt behov for videre arbeid. Først og fremst må tidspunktet nullutslippskrav inntre gjentas. Løsningene må være på plass innen 2026. Da “Grønn Kai”-prosjektet er omfattende, vil dette kreve at arbeidet igangsettes snarest.

Parallelt med alle nyutviklede løsninger blir også økonomiske problemstillinger mer aktuelle. Det prosjekterte fartøyet har en estimert prislapp på om lag 100 millioner. Om dette skal rettferdiggjøres må fartøyet være i stand til å generere avkastning eller merverdi for partene involvert. Det samme gjelder alle andre fartøy og infrastruktur som er særegent prosjektert til Geirangerfjorden. Derfor oppfordres det til videre arbeid av økonomiske modeller som garanterer investorer at Geirangerfjorden vil bli lønnsom, på tross av ny kostbar infrastruktur.

For det prosjekterte fartøyet er det også viktig å se nytten av annen bruk resten av året. Et forslag er å se på lokal infrastruktur. Fartøyet behøver ikke lade ved én lokasjon og gå til en annen, det kan også ligge til kai og bistå på den måten. I fjordene i området er det flere fabrikker og industri som trolig kunne spart midler på å lade fartøyet om natten og benytte seg av denne energien om dagen. Ferjestrekket Molde - Vestnes er også et godt eksempel, hvor mengden strøm tilgjengelig på Vestnes er begrenset. Her kunne også fartøyet bistått. Videre arbeid om alternativ bruk anbefales.

Grunnet fartøyets karakteristikk har behovet for mobile energilager også blitt undersøkt. Her er det også et potensiale for å videreutvikle konseptet til andre energibærere og anvendelser. I denne sammenhengen ble konseptet omdøpt til en *Power Freighter* da begrepet *barge* ble misvisende. Med dette som grunnlag oppfordres det til utvikling av mobile energifraktere og kraftverk som benytter seg av eksempelvis LNG, hydrogen, batterier, diesel eller små modulære reaktorer.

Skipet som er prosjektert har også rom for videreutvikling. Ulike materialtyper ble vurdert, men arbeidet med dette kan forbedres ytterligere. En analyse av karbonfiber eller andre legeringer i aluminium vil kunne gi svar på hvordan vektbesparelser øker systemets effektivitet.

Det oppfordres også til å undersøke mer om svinghjul på skip. Av arbeidet som er gjennomført er det skipstekniske arbeidet mest vektlagt. Fysikken bak svinghjul og tapene som oppstår i en bevegelig anvendelse vil gi svar på mange spørsmål om systemets effektivitet. Regelverk er også en del av dette. Videre arbeid vil trolig bidra til å modne teknologien.

Hydrodynamiske problemstillinger med deplasement-katamaraner ble også erfart gjennom arbeidet. Mer forskning rundt katamaraner som “lasteskip” vil kunne gi bedre kunnskap om disse skrogens nøkkelstørrelser og gode retningslinjer for godt design.

20 Referanseliste

- [1] G. Strand. *Kan bli uten cruiseskip i tre år*. smp.no. 22. nov. 2021. URL: <https://www.smp.no/nyheter/i/5Go5oX/kan-bli-uten-cruiseskip-i-tre-ar> (sjekket 07.03.2023).
- [2] E. Scott. *Utslippsfrie fartøy kan bidra til å bevare cruisetrafikk i Geirangerfjorden*. Forskningsdagene. 9. sep. 2022. URL: <https://www.forskningsdagene.no/nyheter/utslippsfrie-fartoy-kan-bidra-til-a-bevare-cruisetrafikk-i-geirangerfjorden/> (sjekket 07.03.2023).
- [3] NTNU. *Grønn kai - NTNU*. URL: <https://www.ntnu.no/ihb/gronn-kai> (sjekket 07.03.2023).
- [4] S. U. Erstad. *Grøn turisme i Geiranger*. NTNU Nyheter. 17. sep. 2021. URL: <https://www.ntnu.no/nyheter/gron-turisme-i-geiranger/> (sjekket 07.03.2023).
- [5] S. Larsen. *Geiranger trenger kraft tilsvarende 20 000 eneboliger*. Section: nyheter. 7. jul. 2021. URL: <https://www.skipsrevyen.no/geiranger-trenger-kraft-tilsvarende-20-000-eneboliger/204513> (sjekket 08.02.2023).
- [6] T. L. Johansen mfl. *Sluttrapport Grønn Kai 2022*. 2022. (Sjekket 20.12.2022).
- [7] *West Norwegian Fjords – Geirangerfjord and Nærøyfjord - UNESCO World Heritage Centre*. URL: <https://whc.unesco.org/en/list/1195/> (sjekket 08.02.2023).
- [8] Sjøfartsdirektoratet. *Utslipp fra skip i verdensarvfjorder - rapport 2017*. 4. mai 2017. URL: <https://www.sdir.no/sjofart/fartoy/miljo/utslipp-fra-skip/utslipp-fra-skip-i-verdensarvfjorder/> (sjekket 07.03.2023).
- [9] T. Vestre. *Mangel på straum skaper store problem i Geiranger*. NRK. Section: dk. 7. aug. 2021. URL: <https://www.nrk.no/mr/mangel-pa-straum-skaper-store-problem-i-geiranger-1.15599545> (sjekket 07.03.2023).
- [10] NTB. *UNESCO advarer Geiranger*. Tu.no. 11. sep. 2009. URL: <https://www.tu.no/artikler/unesco-advarer-geiranger/240422> (sjekket 07.03.2023).
- [11] O. Economics. *Kabel som alternativ til luftledning — På oppdrag for Olje- og energidepartementet*. 31. jan. 2022. (Sjekket 07.03.2023).
- [12] K.-o. miljødepartementet. *Meld. St. 41 (2016–2017)*. Regjeringen.no. Publisher: regjeringen.no. 16. jun. 2017. URL: <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/meld.-st.-41-20162017/id2557401/> (sjekket 08.03.2023).
- [13] H. M. Markussen. *Utslippsfrie fjorder innen 2026*. Section: nyheter. 4. mai 2018. URL: <https://www.skipsrevyen.no/miljo/utslippsfrie-fjorder-innen-2026/705332> (sjekket 08.03.2023).
- [14] D. G. A. Maritime. *Nullutslipp i 2026 for skip i verdensarvfjordene*. 2019-1250, Rev. 0. 1363 Høvik, 10. feb. 2020. URL: https://www.sdir.no/contentassets/ce0badc8e20b4983aedc364f73d3a954/dnvg1-rapport_2019-1250_rev0_final.pdf?t=1588434015183 (sjekket 08.03.2023).
- [15] K. Å. Øystese. *Å utsette nullutslippskrav i verdensarvfjordene er feil medisin*. Section: meninger-og-analyse. 5. mai 2020. URL: <https://energiogklima.no/meninger-og-analyse/klimavalg21/a-utsette-nullutslippskrav-i-verdensarvfjordene-er-feil-medisin/> (sjekket 08.03.2023).

- [16] P. Spezzano. “Mapping the susceptibility of UNESCO World Cultural Heritage sites in Europe to ambient (outdoor) air pollution”. I: *Science of The Total Environment* 754 (1. feb. 2021), s. 142345. ISSN: 0048-9697. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142345. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720358745> (sjekket 08.03.2023).
- [17] S. Babri mfl. “A simulation model to assess emission reduction policies in tourism transport: Case study of the Geiranger fjord UNESCO world heritage site in Norway”. I: *International Journal of Sustainable Transportation* 0.0 (30. okt. 2022). Publisher: Taylor & Francis _eprint: <https://doi.org/10.1080/15568318.2022.2137712>, s. 1–14. ISSN: 1556-8318. DOI: 10.1080/15568318.2022.2137712. URL: <https://doi.org/10.1080/15568318.2022.2137712> (sjekket 08.03.2023).
- [18] S. Patel. *Of Floating Power Barges and Ships*. POWER Magazine. 1. feb. 2010. URL: <https://www.powermag.com/of-floating-power-barges-and-ships/> (sjekket 08.03.2023).
- [19] M. E. Solutions. *Power barges*. MAN Energy Solutions. URL: <https://www.man-es.com/energy-storage/solutions/thermal-power/power-barges> (sjekket 08.03.2023).
- [20] S. Choudhury. “Flywheel energy storage systems: A critical review on technologies, applications, and future prospects”. I: *International Transactions on Electrical Energy Systems* 31.9 (2021). _eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/2050-7038.13024>, e13024. ISSN: 2050-7038. DOI: 10.1002/2050-7038.13024. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2050-7038.13024> (sjekket 13.04.2023).
- [21] J. McGroarty mfl. “Flywheel energy storage system for electric start and an all-electric ship”. I: *IEEE Electric Ship Technologies Symposium, 2005*. IEEE Electric Ship Technologies Symposium, 2005. Jul. 2005, s. 400–406. DOI: 10.1109/ESTS.2005.1524706.
- [22] Y. Arellano-Prieto mfl. “Energy Storage Solutions for Offshore Applications”. I: *Energies* 15.17 (24. aug. 2022), s. 6153. ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en15176153. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/17/6153> (sjekket 13.04.2023).
- [23] A. Stenvik. *patent*. I: *Store norske leksikon*. 24. jan. 2023. URL: <https://snl.no/patent> (sjekket 08.03.2023).
- [24] A. Pietsch, G. W. Lynch og S. B. Sutherland. “Global Renewable Energy Transportation System”. Patent WO2013188954A1. K. S. C. I. K. S. T. Inc. 27. des. 2013.
- [25] *Hvorfor autonomt*. NFAS. URL: <https://nfas.autonomous-ship.org/hvorfor-autonomt/?lang=no> (sjekket 13.04.2023).
- [26] T. Stensvold. *Storfjorden blir nytt testområde for autonome skip*. Tu.no. 29. sep. 2017. URL: <https://www.tu.no/artikler/storfjorden-blir-nytt-testomrade-for-autonome-skip/408589> (sjekket 08.03.2023).
- [27] Sjøfartsdirektoratet. *Ny side*. URL: <https://www.sdir.no/aktuelt/nyheter/ny-side/> (sjekket 08.03.2023).

- [28] *Ny teknologi for autonome og ubemannede skip*. SINTEF. URL: <https://www.sintef.no/fagomrader/maritimtransport/ny-teknologi-for-autonome-og-ubemannede-skip/> (sjekket 08.03.2023).
- [29] *What We Do*. Making autonomy a reality. URL: <https://www.massterly.com/what-we-do> (sjekket 08.03.2023).
- [30] FN-Sambandet. *Ren energi til alle*. 3. feb. 2023. URL: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/ren-energi-til-alle> (sjekket 07.03.2023).
- [31] FN-Sambandet. *Industri, innovasjon og infrastruktur*. 31. jan. 2023. URL: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/industri-innovasjon-og-infrastruktur> (sjekket 07.03.2023).
- [32] FN-Sambandet. *Stoppe klimaendringene*. 2. feb. 2023. URL: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/stoppe-klimaendringene> (sjekket 07.03.2023).
- [33] *Corvus Blue Whale*. Corvus Energy. URL: <https://corvusenergy.com/products/energy-storage-solutions/corvus-blue-whale/> (sjekket 02.05.2023).
- [34] M. Spendiff-Smith. *What Is A Battery C Rating & How Do I Calculate C Rate*. Power Sonic. 23. feb. 2021. URL: <https://www.power-sonic.com/blog/what-is-a-battery-c-rating/> (sjekket 18.05.2023).
- [35] Ø. Grøn. *kinetisk energi*. I: *Store norske leksikon*. 9. jul. 2021. URL: https://snl.no/kinetisk_energi (sjekket 18.05.2023).
- [36] *Lithium-ion Battery Pack Prices Rise for First Time to an Average of \$151/kWh*. BloombergNEF. Section: Press Release. 6. des. 2022. URL: <https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery-pack-prices-rise-for-first-time-to-an-average-of-151-kwh/> (sjekket 02.05.2023).
- [37] M. M. Rahman mfl. “Energy and environmental footprints of flywheels for utility-scale energy storage applications”. I: *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy 1* (1. jan. 2021), s. 100020. ISSN: 2772-6711. DOI: 10.1016/j.prime.2021.100020. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S277267112100019X> (sjekket 08.05.2023).
- [38] DNV. *[DNV-RU-SHIP Pt.4 Ch.8] Electrical installations - edition Jul, 2022*. Jul. 2021. URL: <https://standards.dnv.com/explorer/document/6CC7BC8A891C47B0A121D33ECAE721> (sjekket 08.05.2023).
- [39] DNV. *[DNV-RU-SHIP Pt.6 Ch.2] Propulsion, power generation and auxiliary systems - edition Jul, 2022*. Jul. 2021. URL: https://standards.dnv.com/explorer/document/376B18602F2A4CAD89C296AC8ABC853E/26#sectionstart_02EC06D7495F4486955F955 (sjekket 08.05.2023).
- [40] *DNV-RP-0043 Safety, operation and performance of grid-connected energy storage systems - Revised*. DNV. URL: <https://www.dnv.com/Default> (sjekket 08.05.2023).
- [41] S. A. Helle, A. E. Folvik og E. Flogeland. “Rapport – Evaluering av hendelse på MS Brim”. I: *Vestfold Interkommunale Brannvesen IKS* (). (Sjekket 08.02.2023).
- [42] H. Bergan-Skar og J. Viddal. “Prosjektering av nullutslipps-sightseeingfartøy”. Accepted: 2022-07-06T17:20:07Z. Bachelor thesis. NTNU, 2022. URL: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/3003249> (sjekket 12.05.2023).

- [43] Google. *Google Maps*. Google Maps. 23. sep. 2023. URL: <https://www.google.com/maps/@62.1959755,7.1093139,33831m/data=!3m1!1e3!5m1!1e4> (sjekket 23.02.2023).
- [44] Stemmann. *FerryCHARGER for electric ferries - Stemmann-Technik*. URL: https://www.stemmann.com/en/products/charging_systems/ferrycharger (sjekket 03.03.2023).
- [45] D. Andrews. "CHOOSING THE STYLE OF A NEW DESIGN - THE KEY SHIP DESIGN DECISION". I: 154 (2012).
- [46] F. Adolfsen. *KYSTBUNKER - IMO 9153018 - ShipSpotting.com - Ship Photos, Information, Videos and Ship Tracker*. URL: <https://www.shipspotting.com/photos/2061728> (sjekket 03.03.2023).
- [47] F. Adolfsen. *GRIPTANK - IMO 8331405 - ShipSpotting.com - Ship Photos, Information, Videos and Ship Tracker*. URL: <https://www.shipspotting.com/photos/2094207> (sjekket 03.03.2023).
- [48] B. Aa. *fredrikke-tonder-olsen_0.jpg (1100×635)*. URL: https://maritimt.com/sites/default/files/ship_reviews/images/fredrikke-tonder-olsen_0.jpg (sjekket 03.03.2023).
- [49] S. V. AS. *kopi_harvest.jpeg (1621×912)*. URL: https://www.nssm.no/wp-content/uploads/2017/11/kopi_harvest.jpeg (sjekket 03.03.2023).
- [50] M. Langåker. *1094011.webp (2116×1410)*. URL: <https://image.oceanspacemedia.com/1094011.webp?imageId=1094011&width=2116&height=1410&format=webp> (sjekket 03.03.2023).
- [51] D. M. Consultant. *How do I Select the Right Hull?* URL: <https://www.dmsonline.us/how-do-i-select-the-right-hull/> (sjekket 23.02.2023).
- [52] B. Pedersen, T. Kaland og Allkunne. *aluminium*. I: *Store norske leksikon*. 12. jan. 2023. URL: <http://snl.no/aluminium> (sjekket 23.02.2023).
- [53] H. Ormestad. *elastisitet – fysikk*. I: *Store norske leksikon*. 21. jan. 2023. URL: http://snl.no/elastisitet_-_fysikk (sjekket 23.02.2023).
- [54] N. Christensen. *aluminiumlegeringer*. I: *Store norske leksikon*. 25. mai 2021. URL: <http://snl.no/aluminiumlegeringer> (sjekket 23.02.2023).
- [55] *Aluminium Alloys - Aluminium 5083 Properties, Fabrication and Applications*. AZoM.com. Section: Materials Article. 19. apr. 2005. URL: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2804> (sjekket 18.05.2023).
- [56] *Aluminium / Aluminum 5086 Alloy (UNS A95086)*. AZoM.com. Section: Materials Article. 30. aug. 2012. URL: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6631> (sjekket 18.05.2023).
- [57] K. Bell og R. W. Meyer. *elementmetoden*. I: *Store norske leksikon*. 11. okt. 2022. URL: <https://snl.no/elementmetoden> (sjekket 12.05.2023).
- [58] Brunvoll. *Controllable Pitch Propellers*. URL: <https://www.brunvoll.no/products/controllable-pitch-propellers> (sjekket 20.05.2023).
- [59] . *Voith Schneider Propeller (VSP) — Voith*. URL: <https://voith.com/corp-en/drives-transmissions/voith-schneider-propeller-vsp.html> (sjekket 06.03.2023).

- [60] Hamilton. *HamiltonJet announces diesel-electric hybrid waterjet trials*. www.boatsales.com.au. URL: <https://www.boatsales.com.au/editorial/details/hamiltonjet-announces-diesel-electric-hybrid-waterjet-trials-124861/> (sjekket 27.04.2023).
- [61] XPS300. Sundolitt. URL: <https://www.sundolitt.com/no/sundolitt/norway/vegg/isolasjon-og-knotteplast/xps300/> (sjekket 29.03.2023).
- [62] ITTC. *ITTC – Recommended Procedures and Guidelines, Resistance Test 7.5 - 02 - 02 - 01*. 2011. URL: <https://ittc.info/media/1217/75-02-02-01.pdf> (sjekket 06.03.2023).
- [63] K. Levander. “System Based Ship Design - NTNU Marine Technology”. I: *Weight Groups* (2012), s. 74–78.
- [64] S. og Bertram. “Ship Design for Efficiency and Economy Butterworth-Heinemann”. I: *Computation of weights and center of mass* (), s. 149–179.
- [65] *FRP Fiberglass Foam Core Sandwich Panel - Buy Fiberglass Sandwich Panel, FRP Sandwich Panel, Fiberglass Foam Sandwich Panel Product on Kingmets*. URL: <https://www.kingmets.com/frp-fiberglass-foam-core-sandwich-panel.html> (sjekket 20.04.2023).
- [66] B. Pedersen. *arkimedesloven*. I: *Store norske leksikon*. 12. jan. 2023. URL: <https://snl.no/arkimedesloven> (sjekket 12.05.2023).
- [67] S. Chakraborty. *Ship Stability - Understanding Intact Stability of Ships*. Marine Insight. 25. jan. 2021. URL: <https://www.marineinsight.com/naval-architecture/intact-stability-of-surface-ships/> (sjekket 24.04.2023).
- [68] *flatetreghetsmoment*. I: *Store norske leksikon*. 21. jan. 2023. URL: <https://snl.no/flatetreghetsmoment> (sjekket 18.05.2023).
- [69] I. H. A. Maritime. *High Speed and Light Craft code*. 2008 Edition, Rev. 0. London, UK, 1. jun. 2008. URL: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/282657/msis34_hsc_code_2000_2008_itos_rev1.01-full-2.pdf (sjekket 27.04.2023).
- [70] R. IMO. *Regulation 13 - Means of escape*. URL: <https://www.imorules.com/GUID-FD648BB1-3991-407E-AD5E-1263AA7F3AD4.html> (sjekket 18.05.2023).
- [71] A. Hellesøy. *CO2 som slokkemiddel — Totalleverandør innen brann og sikkerhet*. 1. aug. 2019. URL: <https://www.nordicfs.no/co2/> (sjekket 27.04.2023).
- [72] *Precession*. I: *Wikipedia*. Page Version ID: 1123015797. 21. nov. 2022. URL: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Precession&oldid=1123015797#Classical_\(Newtonian\)](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Precession&oldid=1123015797#Classical_(Newtonian)) (sjekket 12.03.2023).
- [73] 14:00-17:00. *ISO 2631-5:2018*. ISO. URL: <https://www.iso.org/standard/50905.html> (sjekket 12.05.2023).
- [74] DNV. *[DNV-RU-HSLC Pt.1 Ch.2] Class notations - edition Jul, 2022*. URL: <https://standards.dnv.com/explorer/document/07F3CCBCDB0A445BAD27E0667D100832/12> (sjekket 08.05.2023).
- [75] DNV. *[DNV-RU-HSLC Pt.3 Ch.1] Design principles, design loads - edition Aug, 2021*. URL: <https://standards.dnv.com/explorer/document/348F28A34D844C4ABF871CDE2AC9> (sjekket 08.05.2023).

- [76] [DNV-RU-HSLC Pt.1 Ch.2] *Class notations - edition Jul, 2022*. URL: <https://standards.dnv.com/explorer/document/07F3CCBCDB0A445BAD27E0667D100832/12> (sjekket 19.05.2023).
- [77] DNV. [DNV-RU-HSLC Pt.3 Ch.3] *Hull structural design, aluminium - edition Aug, 2021*. URL: <https://standards.dnv.com/explorer/document/97DABE31A924486BBE5FF9C921E9> (sjekket 08.05.2023).
- [78] K. Hofstad. *vinkelakselerasjon*. I: *Store norske leksikon*. 20. jan. 2022. URL: <https://snl.no/vinkelakselerasjon> (sjekket 19.05.2023).
- [79] *Moment of Inertia*. URL: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/mi.html> (sjekket 19.05.2023).
- [80] *D8 MH - Auxiliary Variable Speed Engine — Volvo Penta*. URL: <https://www.volvopenta.com/marine/all-marine-engines/d8-mh/> (sjekket 10.05.2023).
- [81] B. Engineering. *MAXSURF Resistance manual - MAXSURF — MOSES — SACS Files - MAXSURF — MOSES — SACS - Bentley Communities*. 27. okt. 2022. URL: <https://communities.bentley.com/products/offshore/m/mediagallery/276122> (sjekket 08.05.2023).
- [82] ITTC. *ITTC – Recommended Procedures and Guidelines, Resistance Test 7.5 - 01 - 01 - 01*. 2011. URL: <https://www.ittc.info/media/9571/75-01-01-01.pdf> (sjekket 06.03.2023).
- [83] Kartverket. *på Gulesiders sjøkart*. Gule sider sjøkart. 23. feb. 2023. URL: <https://kart.gulesider.no> (sjekket 23.02.2023).
- [84] ITTC. *ITTC – Recommended Procedures and Guidelines, Resistance Test 7.5 - 02 - 03 - 01.4*. 2011. URL: <https://www.ittc.info/media/9872/75-02-03-014.pdf> (sjekket 06.03.2023).

A Data Energilager

Spinning Energy data

Basert på informasjonsmøte 19.01.2023 med Arne Ove Rødstøl.

Kapasitet: 250 kWh

Spenning Nom.: 1000 VDC

Dimensjoner Høyde: 1500 (1800) mm Bredde: 1000 mm Lengde: 1000 mm

Vekt: 1200 kg

C-rate: 10

Tap per døgnet: ~ 1 %

Virkningsgrad i systemet: 92 %

Levetid: 20 år +

Sykler: 1 000 000

Max rpm: 37 500

Min rpm: 9 000

Sikkerhetsrisiko: Ufarlig

Brannbeskyttelse: Ingen

Ingen giftige stoffer eller gasser

Gv. tetthet: 200 Wh/kg

Vol. tetthet: 250 Wh/l

Corvus Blue Whale data

Eksempelsystem - 4 pakker av 6 strenger hentet fra Corvus Energy 02.05.2023 [33].

Energi: 14448 kWh

Spenning Max: 1142 VDC — Nom: 1075 VDC — Min: 1008 VDC

Dimensjoner Høyde: 2850 mm Bredde: 5560 mm Lengde: 10200 mm

Vekt 122 200 kg

Sikkerhetsrisiko: Ja

Brannbeskyttelse: I henhold til SOLAS

Passivt termisk rømling-isolajson med eksosgassystem på celle-nivå

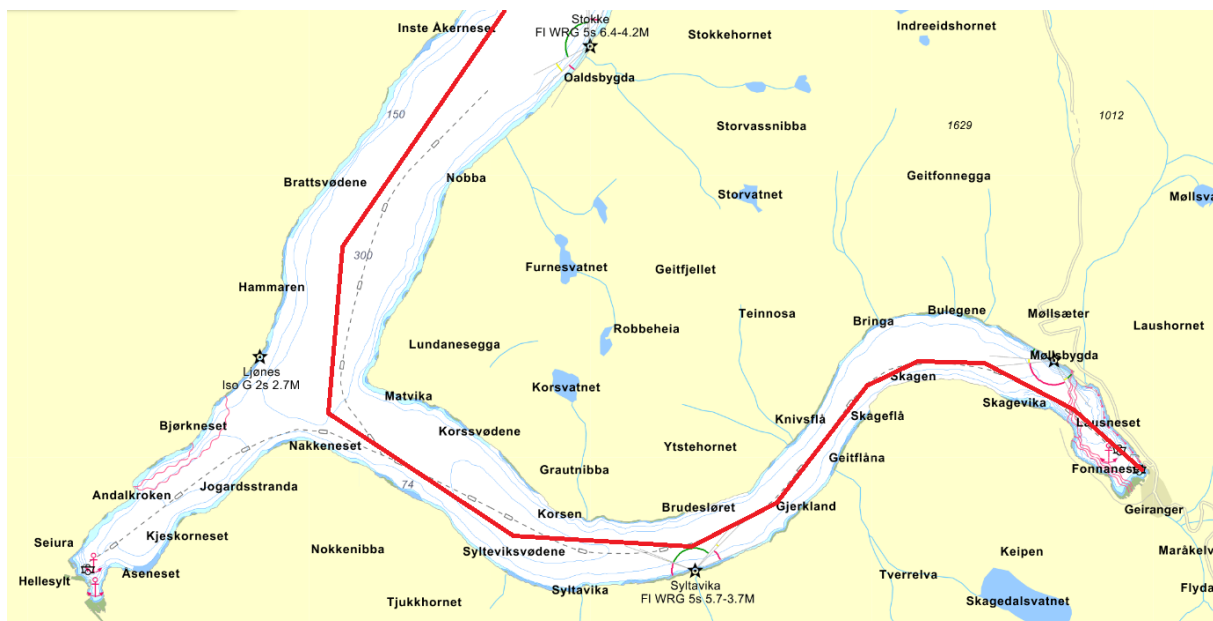
Gv. tetthet: 110 Wh/kg

Vol. tetthet: 130 Wh/l

B Driftsprofil



Figur B.1: Rute gjennom nordlige del av Storfjorden [83]



Figur B.2: Rute gjennom sørlige del av Storfjorden [83]

Tabell B.1: Datagrunnlag driftsprofil.

Energibalanse - 54 moduler			
Tid	Effekt [kWh/h]	Energi [kWh]	Margin [kWh]
4:00	0	13500	1350
5:00	191,5	13309	1350
6:00	191,5	13117	1350
7:00	191,5	12926	1350
8:00	2620	10306	1350
9:00	0	10306	1350
10:00	0	10306	1350
11:00	2620	7686	1350
12:00	0	7686	1350
13:00	0	7686	1350
14:00	2620	5066	1350
15:00	0	5066	1350
16:00	0	5066	1350
17:00	2620	2446	1350
18:00	0	2446	1350
19:00	0	2446	1350
20:00	191,5	2254	1350
21:00	191,5	2063	1350
22:00	191,5	1871	1350
23:00	0	1871	1350
0:00	-3876	5747	1350
1:00	-3876	9624	1350
2:00	-3876	13500	1350
3:00	0	13500	1350

Transit til
Geiranger

Lading #1

Lading #2

Lading #3

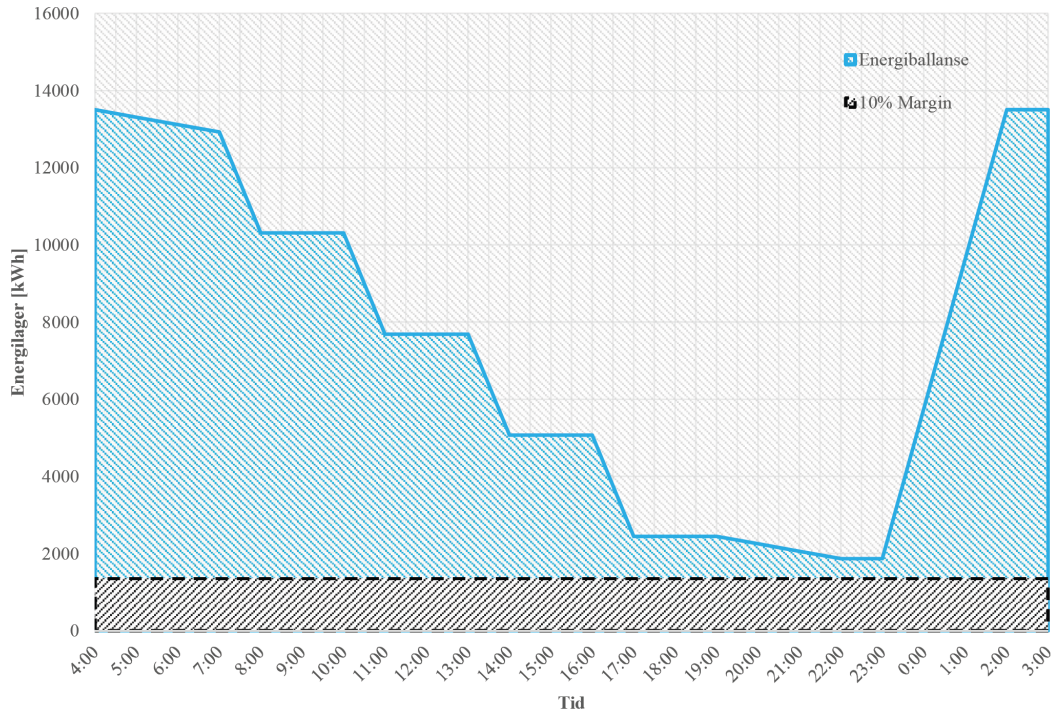
Lading #4

Transit til
Linge

Oppladning

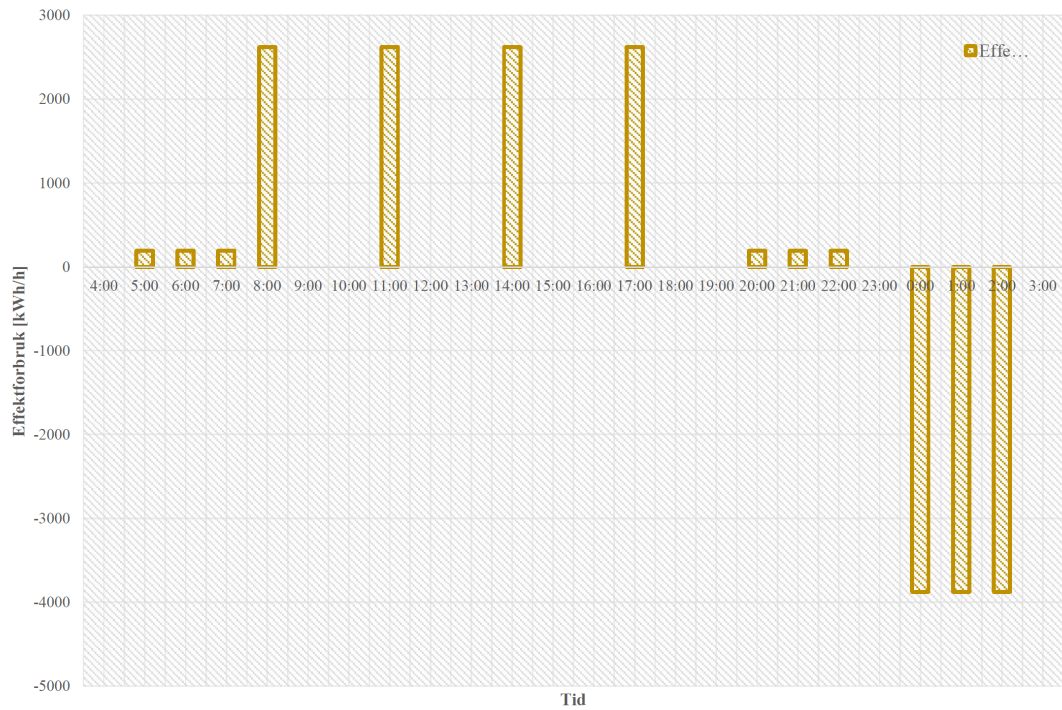
Forbruk i transit er sammensatt av slepemotstand, aktuelle virkningsgrader. Det er antatt at fremdrift utgjør 90% av totalt forbruk, og resterende 10% går til skipets systemer.

Driftsprofil - Energibalanse



Figur B.3: Energibalansen over et døgn.

Driftsforbruk - Effekt



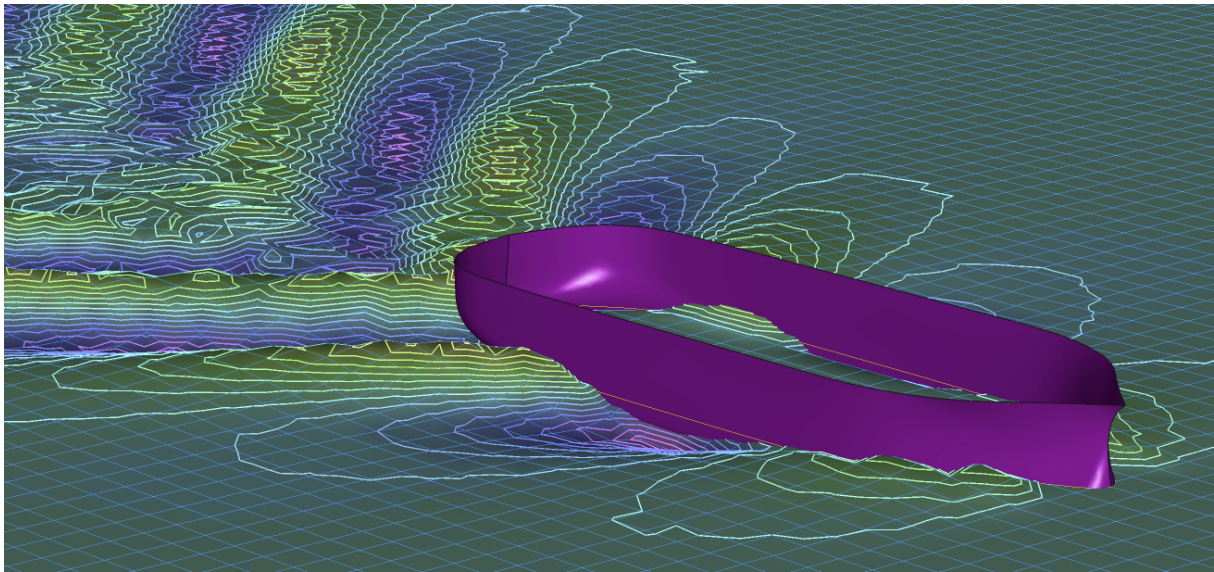
Figur B.4: Effekt i energiovergangene fra driftprofil.

C Oversikt Bottom-up

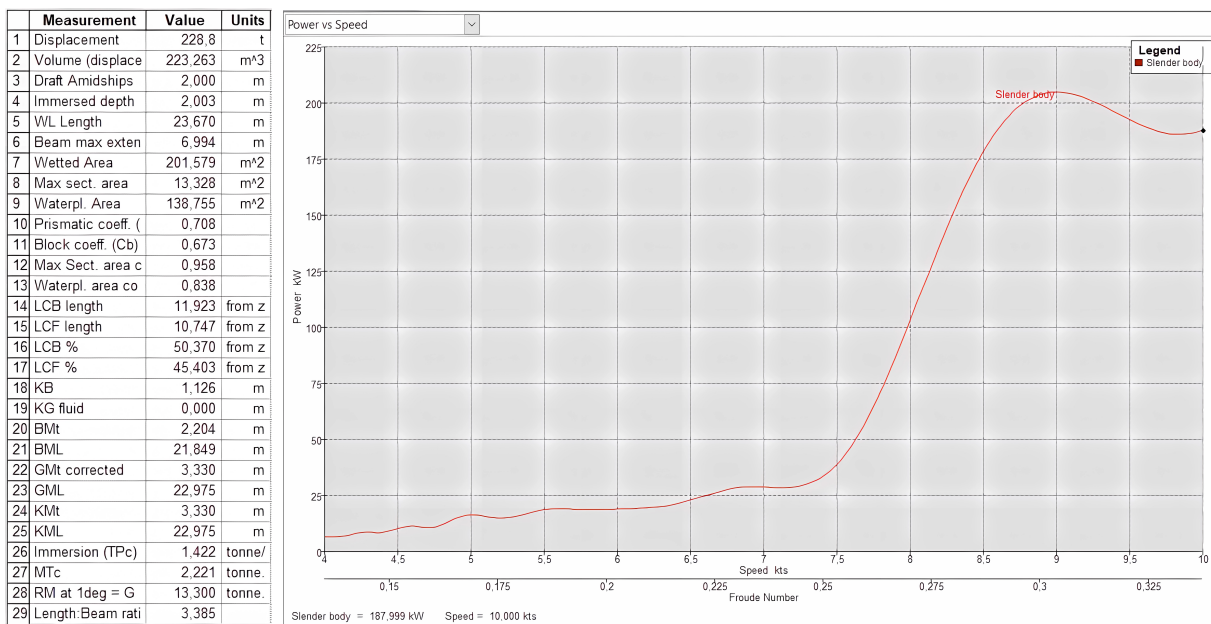
Tabell C.1: DBB

Energy storage systems	Energy storage units	Flywheel units	
		Connection cables	
	Power controls	Power control room	
		Charging cables	
Ship systems	Machinery	Emergency generator	Fuel tank Starter battery Genset
	Maneuvering	Azimuth thrusters	
		Bow thruster	
	Tanks	Ballast	
	Safety	Raft	
		Anchor	Anchor
			Chain
		Windlass	
	Controll and crew	Bridge	Crew area Crew head Control station
	Mooring	Deck storage	
Automatic mooring			

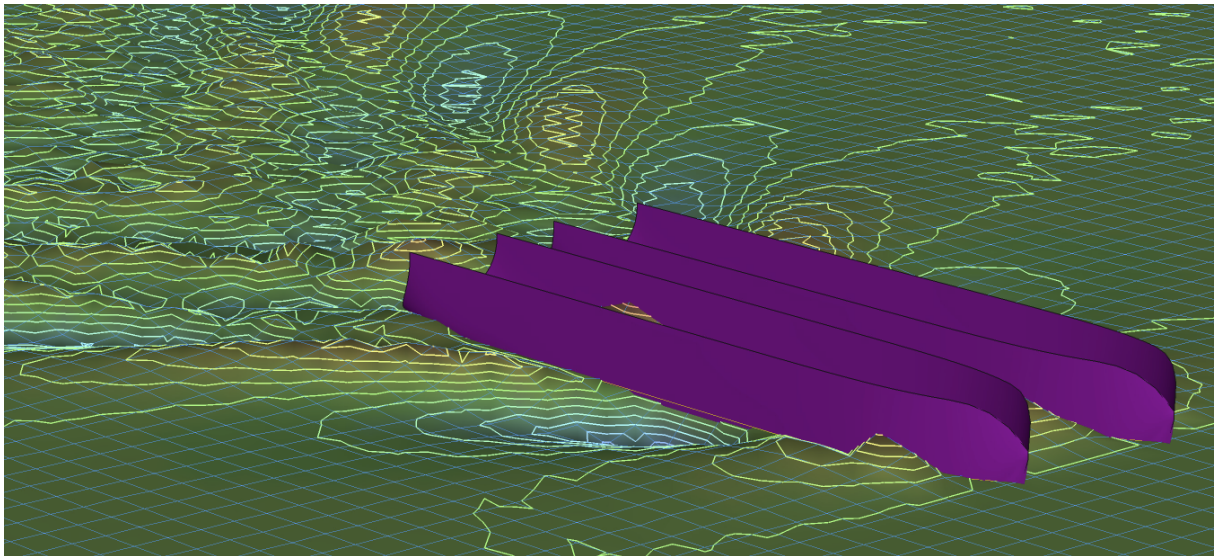
D Skrogvurdering



Figur D.1: Tidlig testing av bølgedannelser i Maxsurf Resistance for et konvensjonelt skrog.

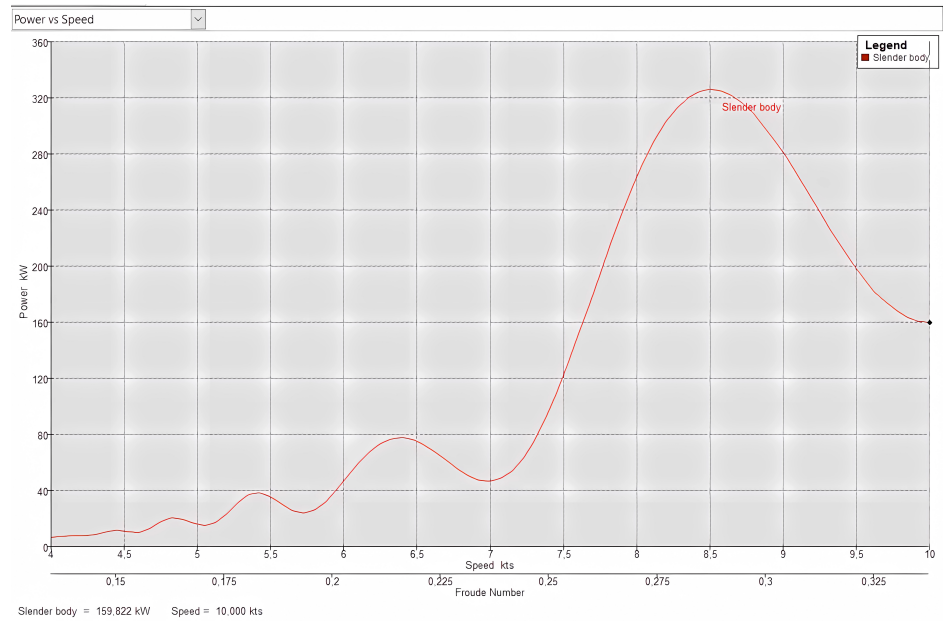


Figur D.2: Tidlig testing av hydrostatikk og motstand fra Maxsurf for et konvensjonelt skrog.



Figur D.3: Tidlig testing av bølgedannelser i Måxsurf Resistance for en katamaran.

Measurement	Value	Units
1 Displacement	177.4	t
2 Volume (displace	173.028	m³
3 Draft Amidships	2.000	m
4 Immersed depth	2.000	m
5 WL Length	23.629	m
6 Beam max exten	7.969	m
7 Wetted Area	234.755	m²
8 Max sect. area	10.985	m²
9 Waterpl. Area	125.331	m²
10 Prismatic coeff. (0.667	
11 Block coeff. (Cb)	0.616	
12 Max Sect. area c	0.925	
13 Waterpl. area co	0.893	
14 LCB length	11.273	from z
15 LCF length	9.416	from z
16 LCB %	47.709	from z
17 LCF %	39.848	from z
18 KB	1.135	m
19 KG fluid	0.000	m
20 Bmt	5.004	m
21 BML	28.058	m
22 GMt corrected	6.140	m
23 GML	29.194	m
24 KMt	6.140	m
25 KML	29.194	m
26 Immersion (TPc)	1.285	tonne/
27 MTc	2.183	tonne.
28 RM at 1deg = G	19.004	tonne.
29 Length:Beam rati	3.979	

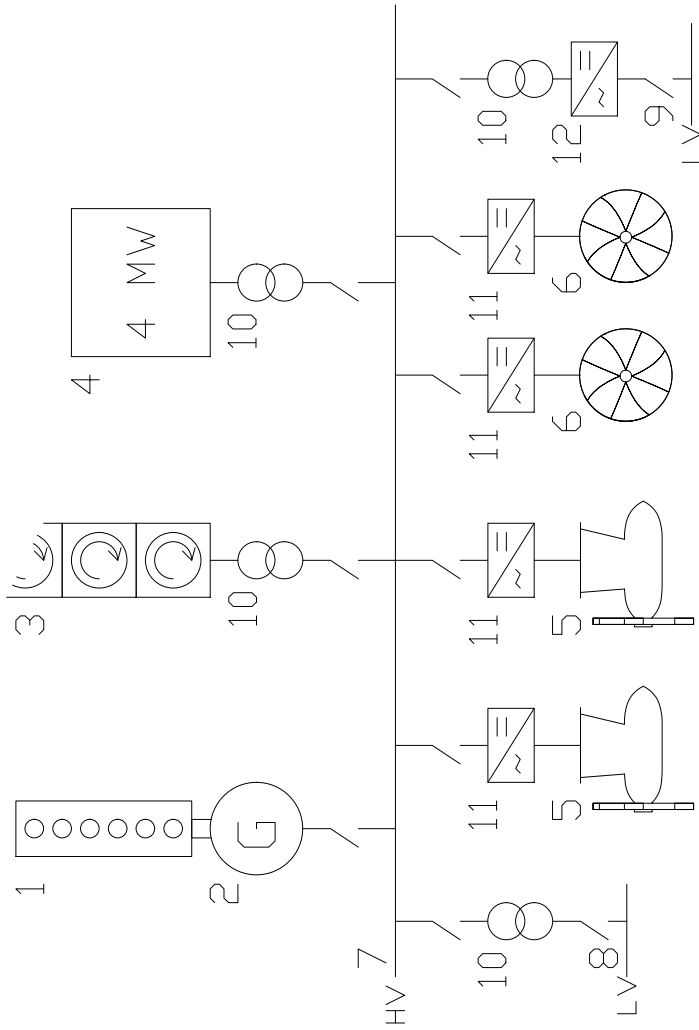


Figur D.4: Tidlig testing av hydrostatikk og motstand fra Måxsurf for for en katamaran.

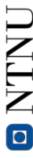
E Maskineri

Single Line Diagram

1. 300KW DIESEL ENGINE
2. 300KW GENERATOR
3. FESS 13.5MWH
4. 4MW CHARGER
5. MAIN THRUSTER
6. BOW THRUSTER
7. HIGH VOLTAGE DC BUS @1000V
8. LOW VOLTAGE NETWORK 24V DC
9. LOW VOLTAGE NETWORK 230V AC
10. TRANSFORMER
11. PWM CONVERTER
12. DC/AC CONVERTER

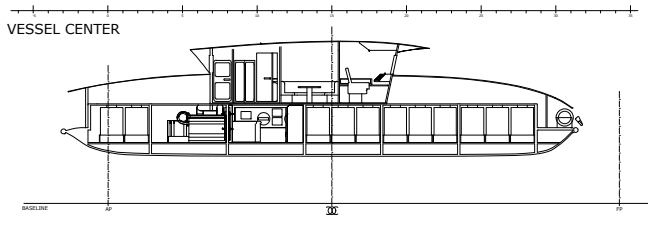


VIII

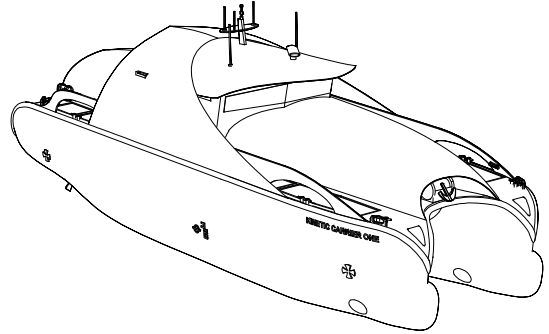
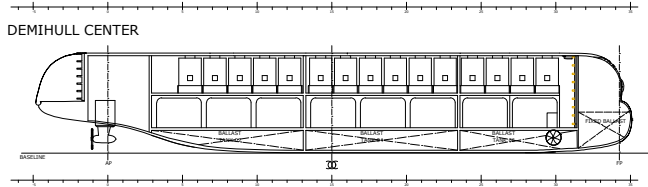
Date: 09.05.2023	Drawn by: L.V. LARSEN	Designed by: L.V. LARSEN & H.J. SVEEN	 DESIGNED BY SVEEN & LARSEN
SINGLE LINE DIAGRAM KINETIC CARRIER ONE			Replaces: Ex-00
			Replaced by: Ex-01

F Teknisk Dokumentasjon

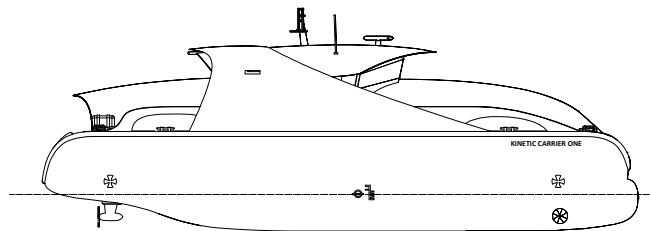
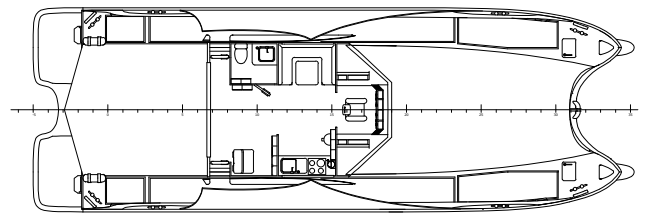
VESSEL CENTER



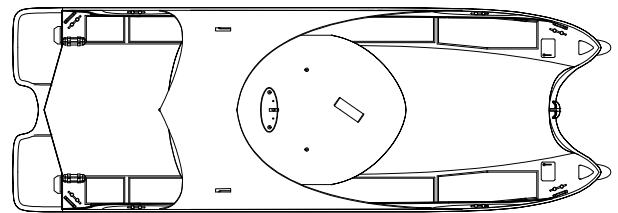
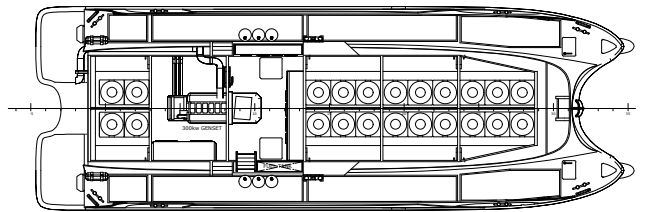
DEMIHULL CENTER



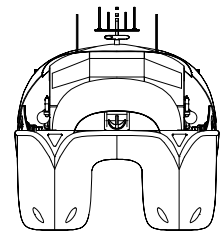
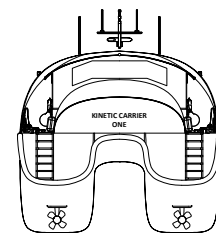
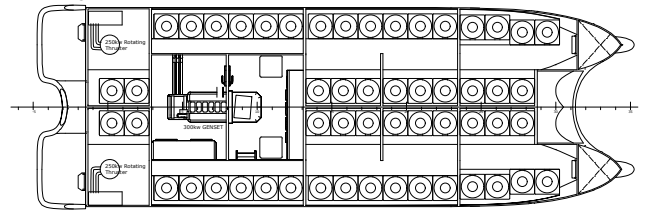
BRIDGE DECK



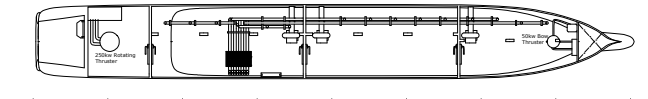
MAIN DECK



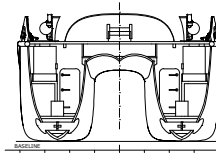
TWEEN DECK



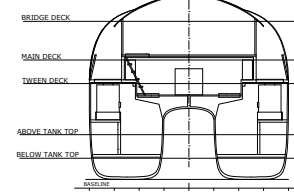
ABOVE TANKTOP



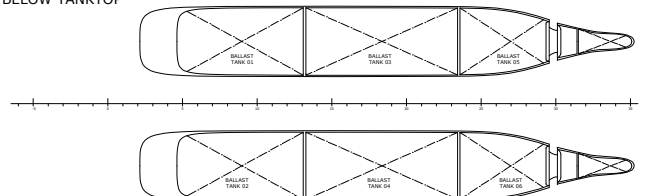
Section 18.1m from AP



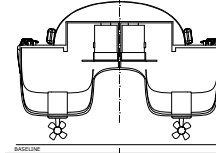
MIDSHIP (7.2m from AP)



BELOW TANKTOP



Section 0.3m from AP

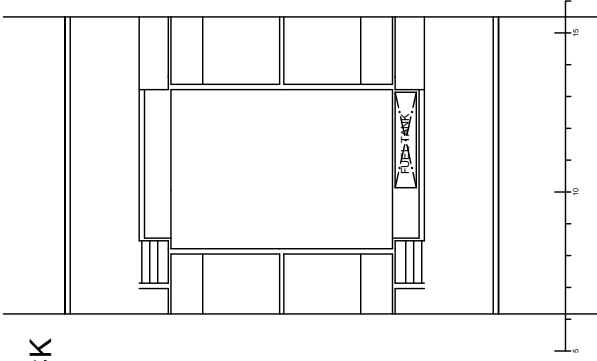


MAIN DIMENSIONS	
LOA	23.9m
Lsp	20.6m
Lwl	23.19m
BEAM	5m
DRAUGHT	1.45m
LIGHTWEIGHT	130.9t
DEADWEIGHT	0.5t
GT	166.04

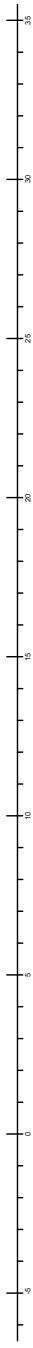
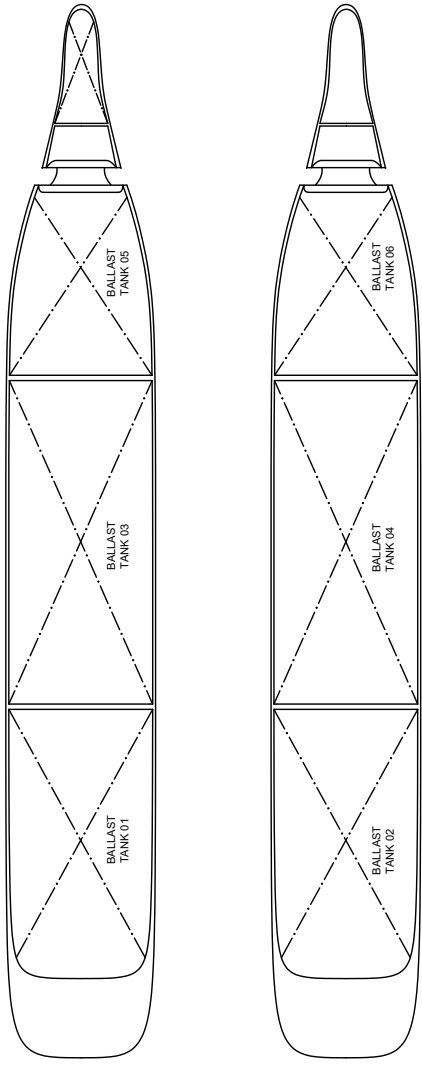
Date		Drawn by		Designed by		NTNU	
04.05.2023		L.V. LARSEN		L.V. LARSEN & H.J. SVEEN		NTNU DESIGNED BY OTTE & LARSEN	
GENERAL ARRANGEMENT KINETIC CARRIER ONE						Ex-07	Ex-08

Tankplan

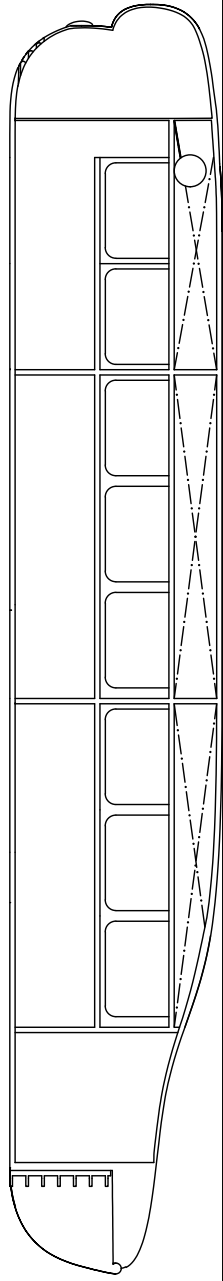
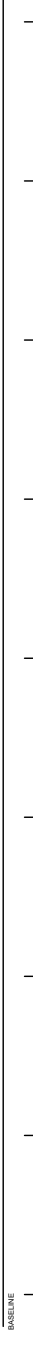
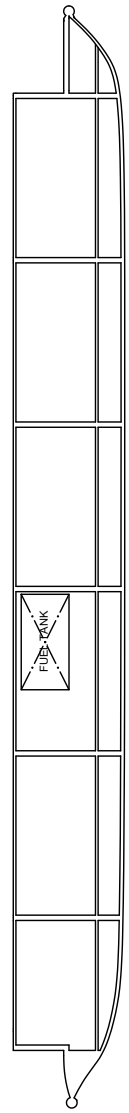
MAIN DECK



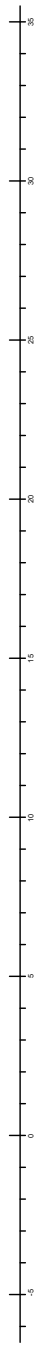
BELOW TANKTOP



X



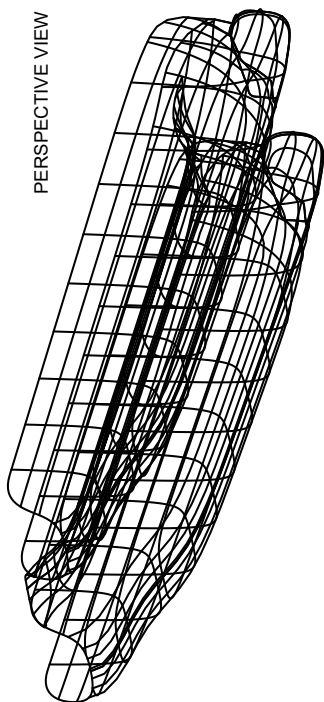
BASELINE



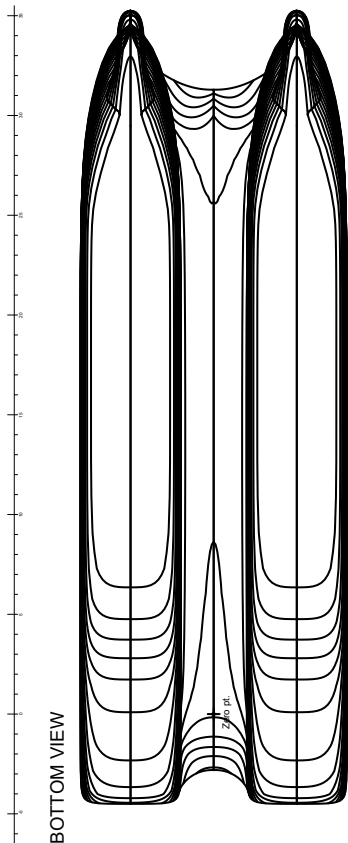
TANKPLAN					
Volum [m ³]	Tetthet [t/m ³]	LCG [m]	VCG [m]	TCG [m]	
Ballast Tank 01	9.51	1.03	6.20	0.70	-2.50
Ballast Tank 02	9.51	1.03	6.20	0.70	2.50
Ballast Tank 03	10.68	1.03	11.10	0.60	-2.50
Ballast Tank 04	10.68	1.03	11.10	0.60	2.50
Ballast Tank 05	6.37	1.03	16.40	0.65	-2.50
Ballast Tank 06	6.37	1.03	16.40	0.65	2.50
Fuel tank	0.57	0.85	7.00	4.40	2.35

Date: 01.05.2023	Drawn by: L.V. LARSEN	Designed by: L.V. LARSEN & H.J. SVEN	NTNU DESIGNED BY PETER A. LARSEN Project: Ex-02
TANK PLAN KINETIC CARRIER ONE			Ex-03

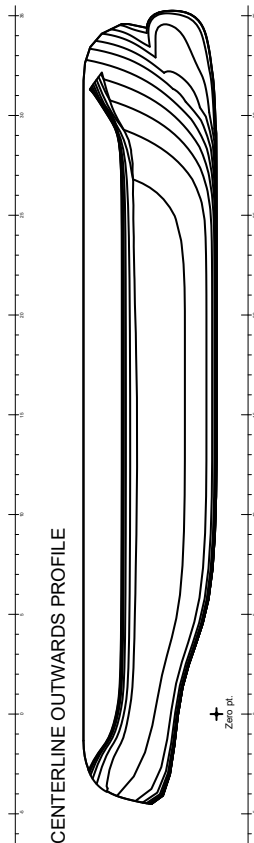
Linjetegning



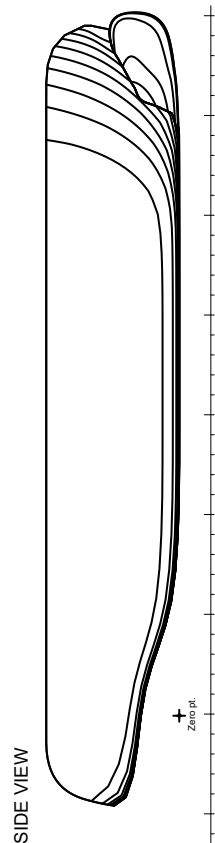
PERSPECTIVE VIEW



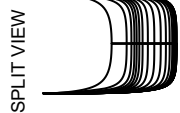
BOTTOM VIEW



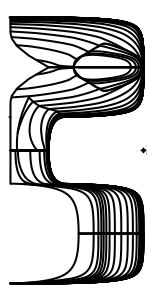
CENTERLINE OUTWARDS PROFILE



SIDE VIEW



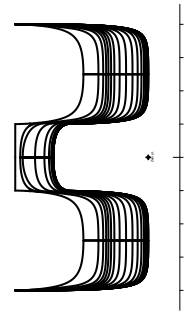
SPLIT VIEW



FRONT VIEW



REAR VIEW



SINGLE HULL SPLIT VIEW

MAIN DIMENSIONS	
LOA	23.9m
LBP	20.6m
KEEL	2.8m
BEAM	8.0m
DRAUGHT	1.8m
LIGHTWEIGHT	121t
DEADWEIGHT	54.45t

Date: 21.04.2023
 Drawn by: H. J. SVEEN
 Designed by: L.V. LARSEN & H.J. SVEEN



LINES PLAN
 KINETIC CARRIER ONE

Ex-102-106

G Prosedyre Modellforsøk

ITTC's prosedyre **7.5-02-02-01** og **7.5-02-03-01.4** hentet 06.03.2023 [62] [84].

Dekomponering av målte verdier i slepetank fra målt motstand til motstandskoeffisienten.

$$\text{Totalmotstandskoeffisient: } C_T = \frac{R_T}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^2} \quad (\text{G.1})$$

Friksjonsleddet i den totale motstanden basert på ITTC's friksjonslinje av Reynoldstall.

$$\text{ITTC 57' korrelasjonslinje for skalamodeller: } C_F = \frac{0.075}{(\log_{10} Re - 2)^2} \quad (\text{G.2})$$

Restmotstaden fra tankforsøket. Totale motstand målt reduseres for friksjon. Restmotstanden videreføres.

$$\text{Koeffisient for restmotstand: } C_R = C_{TM} - C_{FM}(1 + k) \quad (\text{G.3})$$

$$\text{Reynoldstall: } Re = \frac{V \cdot L}{\nu} \quad (\text{G.4})$$

$$\text{Froudetall: } Fn = \frac{V}{\sqrt{g \cdot L}} \quad (\text{G.5})$$

$$\text{Formfaktor: } k = 0.6 \cdot \phi + 145 \cdot \phi^{3.5} \quad (\text{G.6})$$

hvor:

$$\phi = \frac{C_b}{LWL} \cdot \sqrt{(T_{AP} \cdot T_{FP}) \cdot B} \quad (\text{G.7})$$

$$\text{Roughness Allowance: } \Delta C_F = 0.044 \left[\left(\frac{k_s}{LWL} \right)^{\frac{1}{3}} - 10 \cdot Re^{-\frac{1}{3}} \right] + 0.000125 \quad (\text{G.8})$$

$$\text{Correlation Allowance: } C_A = (5.68 - 0.6 \log(Re)) \cdot 10^{-3} \quad (\text{G.9})$$

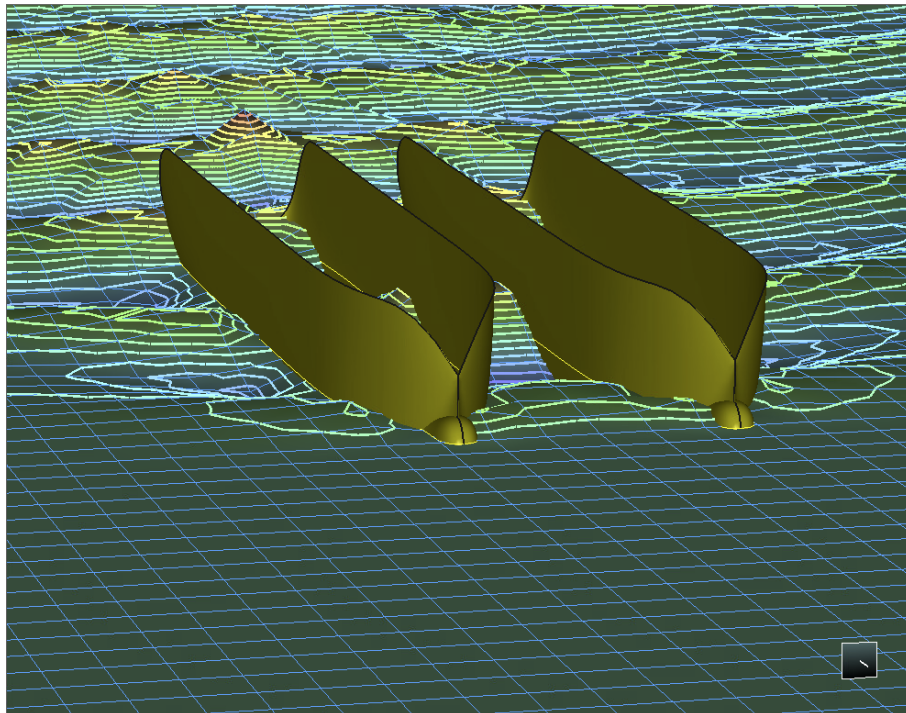
$$\text{Luftmotstandskoeffisient fullskala: } C_{AAS} = C_D \cdot \frac{\rho_A \cdot A_{VS}}{\rho_S \cdot S_S} \quad (\text{G.10})$$

Restmotstandskoeffisienter og modeller fra ITTC settes sammen til en total motsandskoeffisient for fullskala.

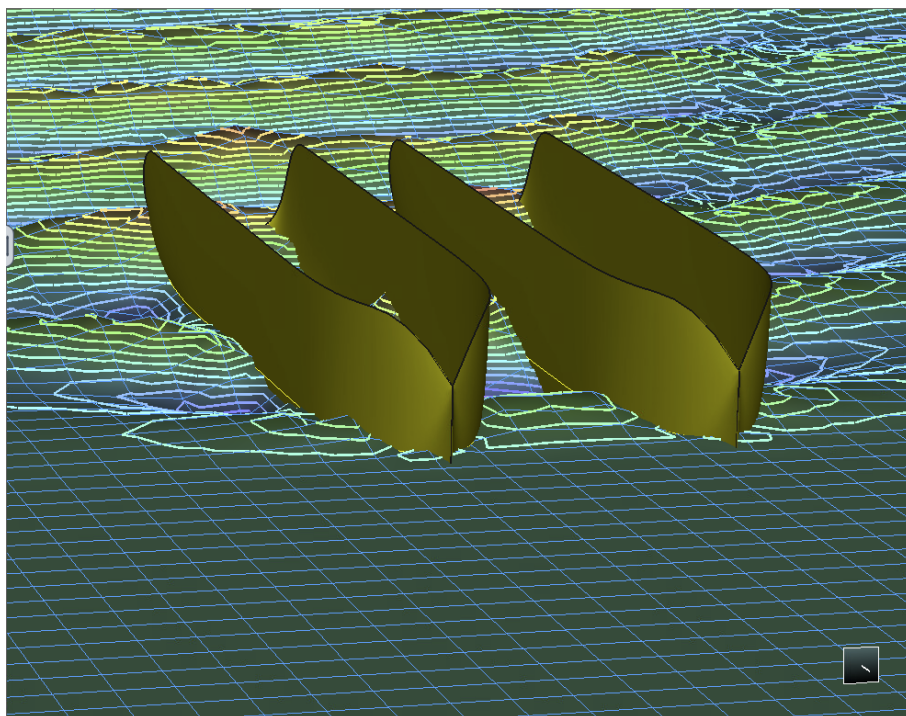
$$\text{Totalmotstandskoeffisient fullskala: } C_{TS} = C_{FS}(1 + k) + C_R + \Delta C_F + C_A + C_{AAS} \quad (\text{G.11})$$

H Skrogmotstand

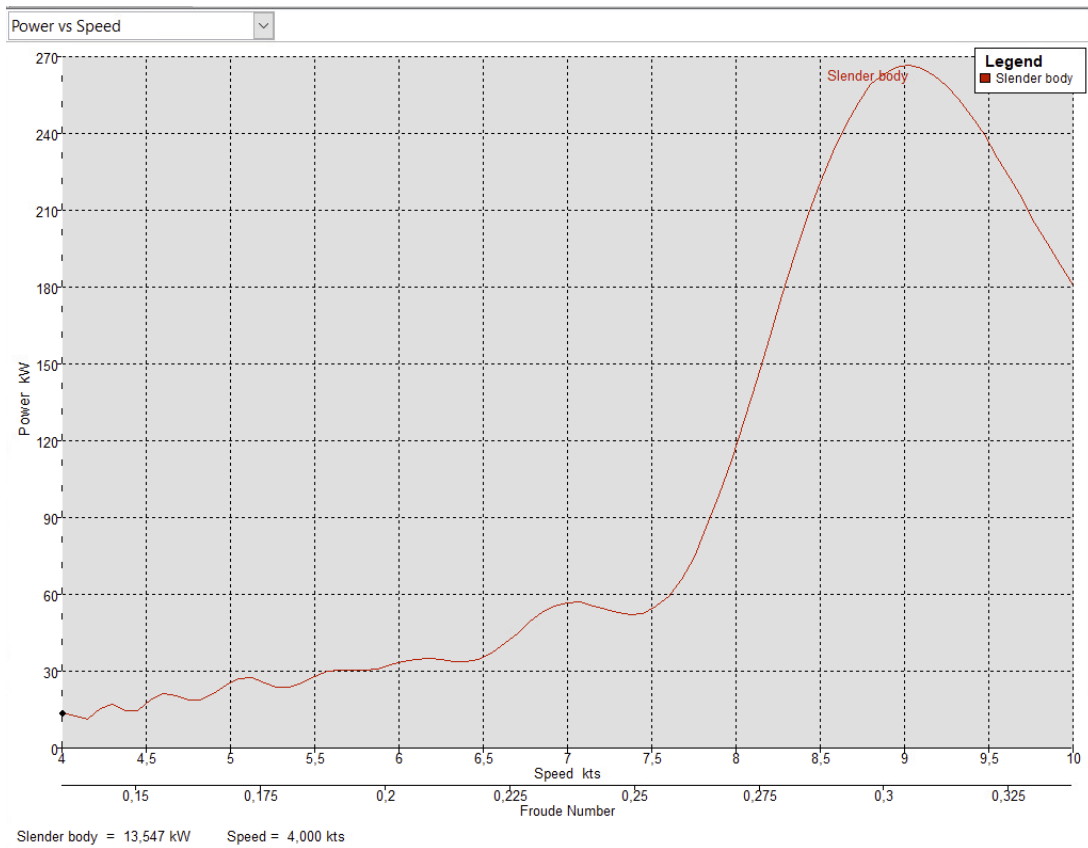
Motstand: Empiri



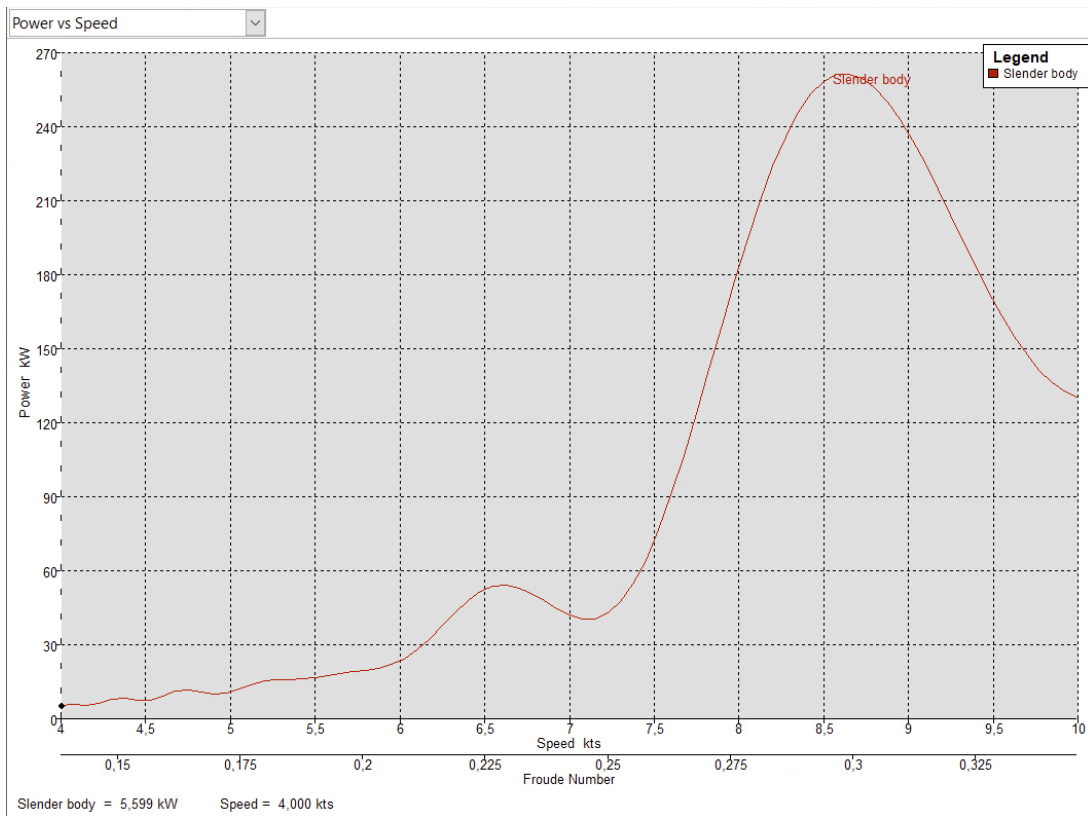
Figur H.1: Bølgesimulering 8 knop for skroget med bulb.



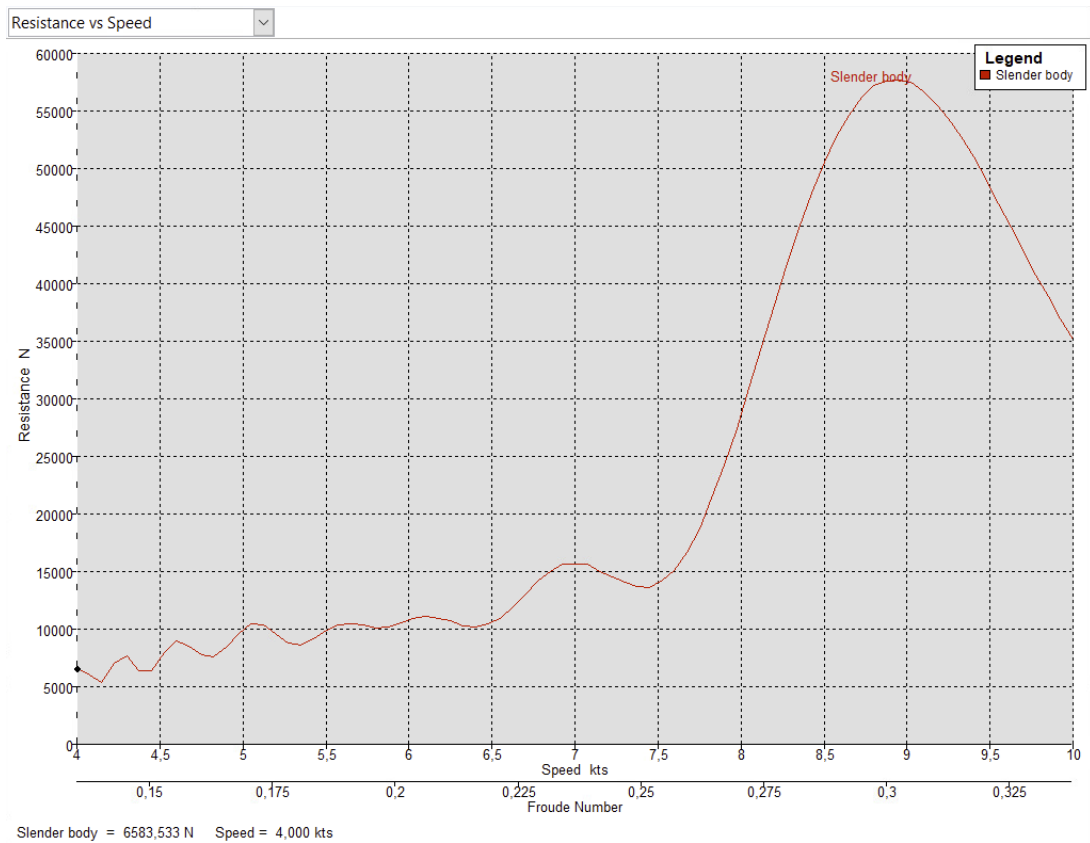
Figur H.2: Bølgesimulering 8 knop for skroget uten bulb.



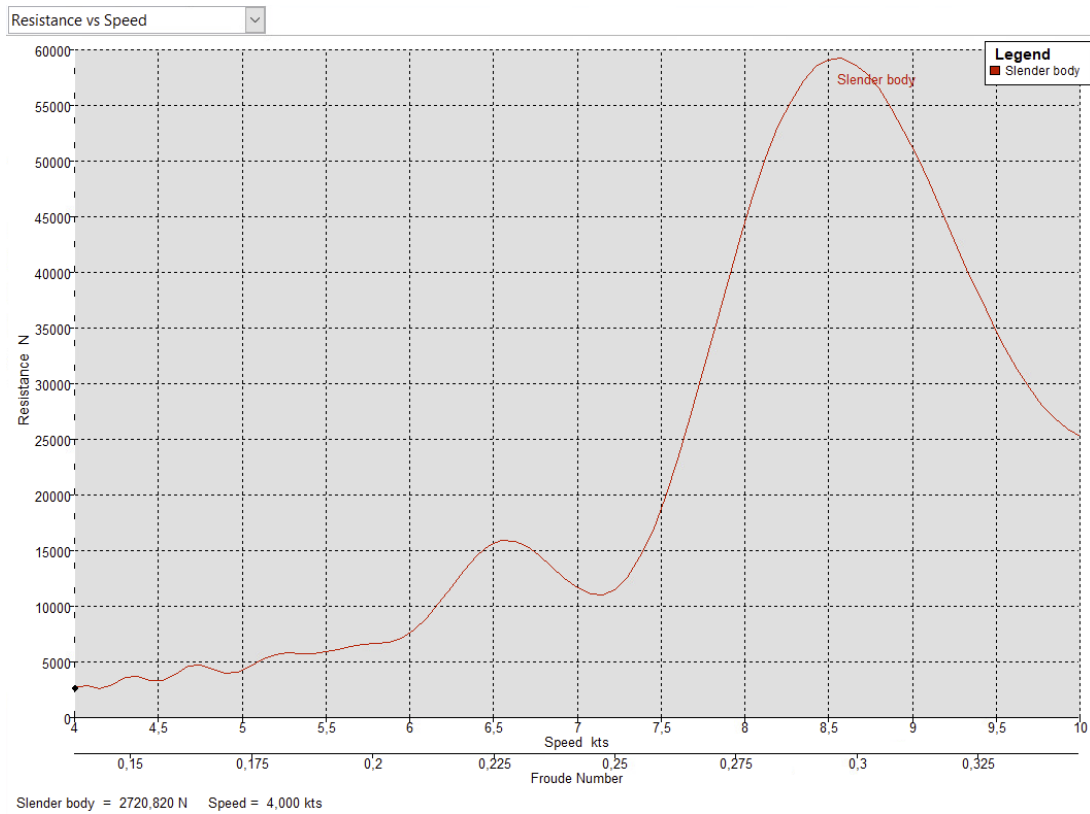
Figur H.3: Power v. Speed for skroget med bulb i intervallet 4 til 10 knop.



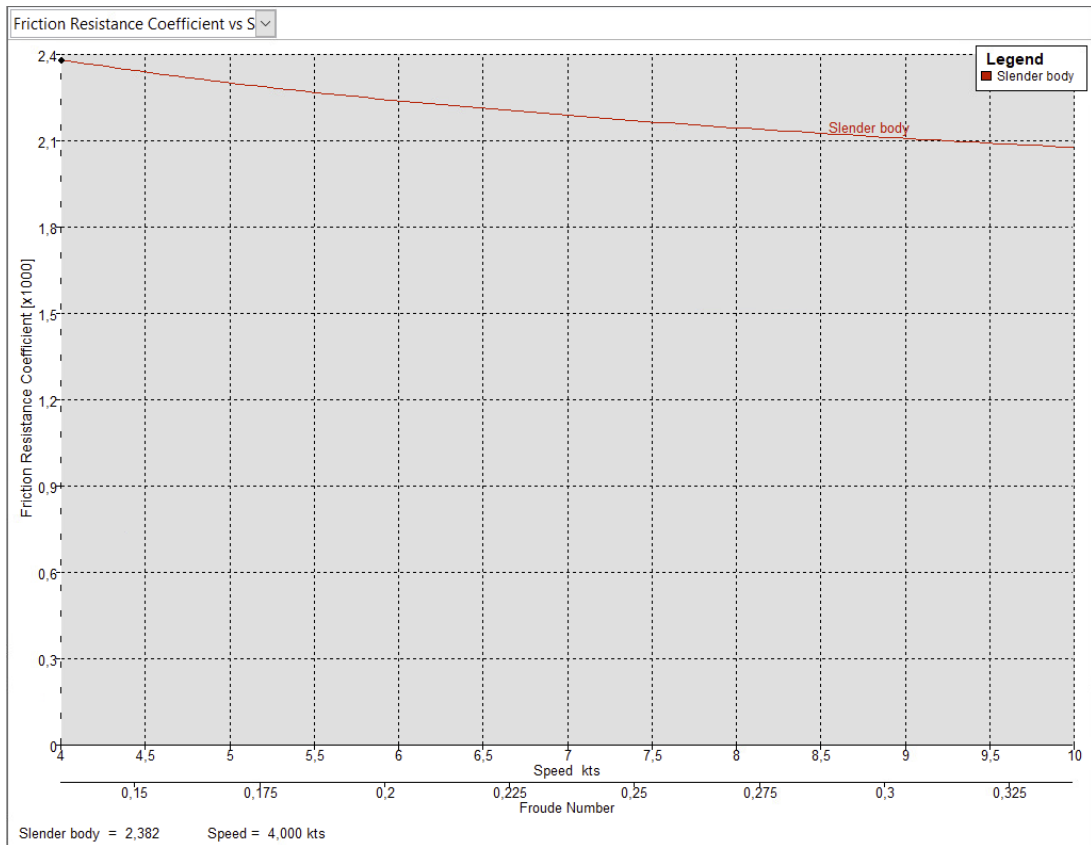
Figur H.4: Power v. Speed for skroget uteb bulb i intervallet 4 til 10 knop.



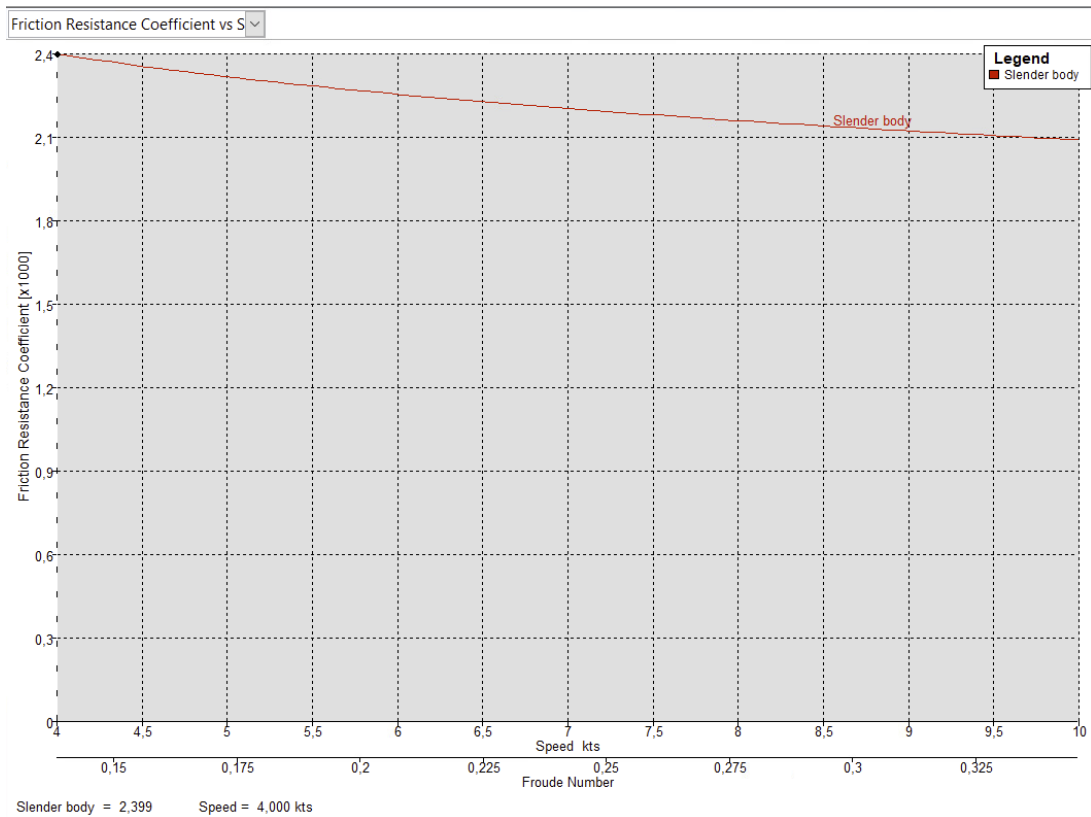
Figur H.5: Resistance v. Speed for skroget med bulb i intervallet 4 til 10 knop.



Figur H.6: Resistance v. Speed for skroget uten bulb i intervallet 4 til 10 knop.



Figur H.7: Friksjonsmotstandskoeffisienten for skroget med bulb i intervallet 4 til 10 knop.



Figur H.8: Friksjonsmotstandskoeffisienten for skroget uten bulb i intervallet 4 til 10 knop.

Motstand: Slepeforsøk

EGENSKAPER SKIP UB					EGENSKAPER SKIP MB				
data	symbol	verdi	enhet	komm.	data	symbol	verdi	enhet	komm.
Total Lengde	LOA _S	23,6	m	RHN	Total Lengde	LOA _S	23,9	m	RHN
Dyppgang	T _S	1,47	m	MAX	Dyppgang	T _S	1,47	m	MAX
Bredde	B _{WL}	6	m	RHN	Bredde	B _{WL}	6	m	RHN
Våt overflate	S _S	201	m ²	MAX	Våt overflate	S _S	201,75	m ²	MAX
Deplasement	Δ _S	129,6	t	MAX	Deplasement	Δ _S	131,9	t	MAX
LCB fra AP	LCB _S	9,75	m	MAX	LCB fra	LCB _S	10,0	m	MAX
Vannlinjelengde	L _{wl,S}	22,5	m	MAX	Vannlinjelengde	L _{wl,S}	23,175	m	MAX
Blokkoeffisient	C _B	0,65	-	MAX	Blokkoeffisient	C _B	0,65	-	MAX
Viskositet	ν _S	1,19E-06	m ² /s		Viskositet	ν _S	1,19E-06	m ² /s	
Tetthet vann	ρ _S	1025	kg/m ³		Tetthet vann	ρ _S	1025	kg/m ³	
Ruhet	k _S	1,50E-04	m		Ruhet	k _S	1,50E-04	m	
Projisert areal ov _i	A _S	43,6	m ²	ACD	Projisert areal ov _i	A _S	43,6	m ²	ACD
Tetthet luft	ρ _A	1,225	kg/m ³		Tetthet luft	ρ _A	1,225	kg/m ³	
Drag	C _d	1	-		Drag	C _d	1	-	

EGENSKAPER MODELL UB					EGENSKAPER MODELL MB				
data	symbol	verdi	enhet	komm.	data	symbol	verdi	enhet	komm.
Total Lengde	LOA _m	1,13	m	SCL	Total Lengde	LOA _m	1,14	m	SCL
Dyppgang	T _m	0,07	m	SCL	Dyppgang	T _m	0,07	m	SCL
Bredde	B _m	0,29	m	SCL	Bredde	B _m	0,29	m	SCL
Våt overflate	S _m	0,46	m ²	SCL	Våt overflate	S _m	0,46	m ²	SCL
Deplasement	Δ _m	14,0	kg	SCL	Deplasement	Δ _m	14,2	kg	SCL
LCB fra	LCB _m	0,46	m	SCL	LCB fra	LCB _m	0,48	m	SCL
Vannlinjelengde	L _{wl,m}	1,07	m	SCL	Vannlinjelengde	L _{wl,m}	1,10	m	SCL
Blokkoeffisient	C _B	0,65	-	MAX	Blokkoeffisient	C _B	0,65	-	MAX
Viskositet	ν _m	1,14E-06	m ² /s		Viskositet	ν _m	1,14E-06	m ² /s	
Tetthet vann	ρ _m	1000	kg/m ³		Tetthet vann	ρ _m	1000	kg/m ³	
Projisert areal ov _i	A _m	-	m ²	SCL	Projisert areal ov _i	A _m	-	m ²	SCL
Tetthet luft	ρ _A	1,225	kg/m ³		Tetthet luft	ρ _A	1,225	kg/m ³	

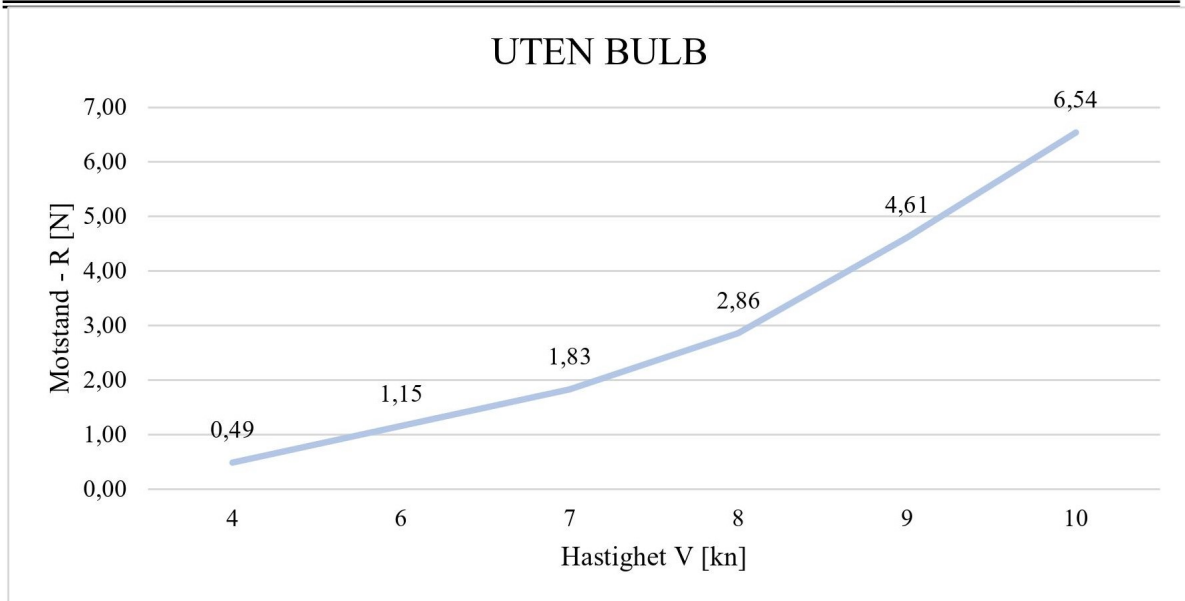
Formkoeffisient:	φ	0,12
	k	0,16
	1+k	1,16

Formkoeffisient:	φ	0,12
	k	0,15
	1+k	1,15

Figur H.10: Inndata til beregninger slepeforsøk.

Gain: -0,065343

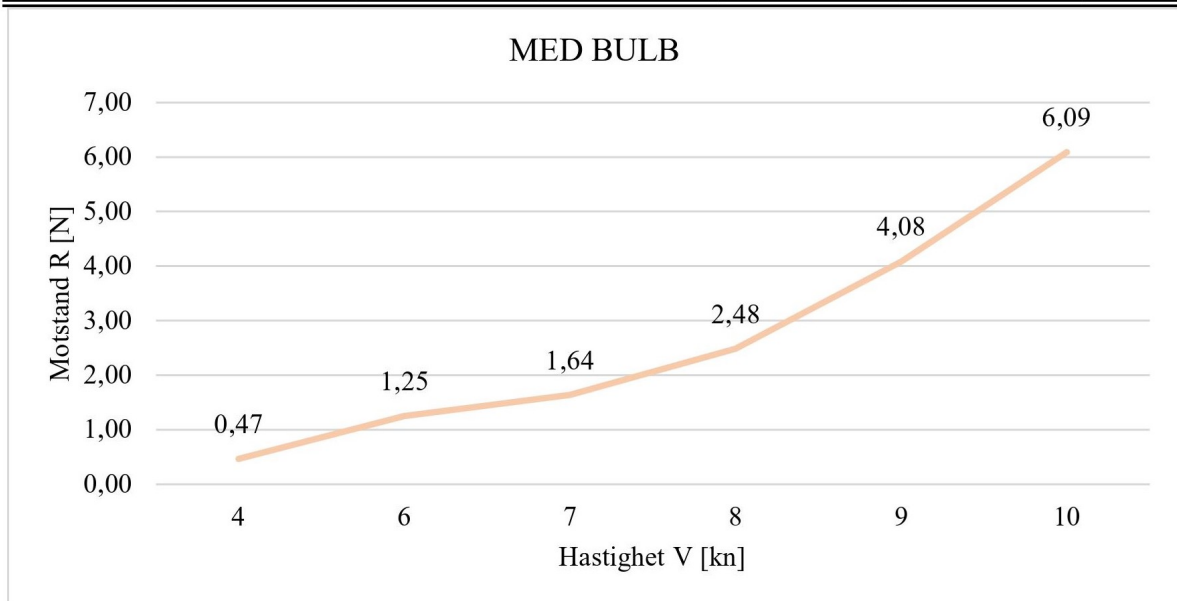
UTEN BULB							
Hastighet [kn]							
	4	6	7	8	9	10	
Måling nr.	1	0,49069	1,11901	1,84902	2,85317	4,62758	6,51941
	2	0,48251	1,16818	1,85185	2,83060	4,65000	6,50913
	3	0,49361	1,12378	1,78237	2,84184	4,48561	6,34783
	4	0,47737	1,15510	1,81329	2,84024	4,69839	6,66647
	5	0,49393	1,20647	1,82881	2,93375	4,58377	6,65027
Avg.	0,49	1,15	1,83	2,86	4,61	6,54	



Figur H.11: Rådata fra Slepetanken uten bulb.

Gain: -0,065343

MED BULB							
Hastighet [kn]							
	4	6	7	8	9	10	
Måling nr.	1	0,46350	1,26228	1,67169	2,59153	4,07854	5,92230
	2	0,44648	1,23024	1,59799	2,40616	4,16579	6,17876
	3	0,45933	1,30582	1,65927	2,45781	4,03904	6,10587
	4	0,48298	1,22403	1,68540	2,46608	4,04032	6,06302
	5	0,47586	1,23444	1,56485	2,49953	4,09404	6,20417
Avg.	0,47	1,25	1,64	2,48	4,08	6,09	



Figur H.12: Rådata fra Slepetanken med bulb.

Knop	Vs	Vm	Rtm	Ctm	Cfm	Fn	RNm
4	2,06	0,45	0,49	0,011	5,71E-03	0,14	4,22E+05
6	3,09	0,67	1,15	0,011	5,19E-03	0,20	6,33E+05
7	3,60	0,79	1,83	0,013	5,01E-03	0,24	7,39E+05
8	4,12	0,90	2,86	0,016	4,86E-03	0,27	8,44E+05
9	4,63	1,01	4,61	0,020	4,74E-03	0,30	9,50E+05
10	5,14	1,12	6,54	0,023	4,63E-03	0,34	1,06E+06

Uten Bulb									
RNs	Cr	Cfs	ΔCf	Ca	Caas		Cts	Rts	
3,89E+07	49,1E-4	2,40E-03	-3,45E-04	1,13E-03	2,59E-04		8,74E-03		3 811
5,84E+07	59,8E-4	2,26E-03	-1,81E-04	1,02E-03	2,59E-04		9,70E-03		9 518
6,81E+07	79,6E-4	2,20E-03	-1,24E-04	9,80E-04	2,59E-04		1,16E-02		15 543
7,78E+07	106,9E-4	2,16E-03	-7,75E-05	9,45E-04	2,59E-04		1,43E-02		25 011
8,75E+07	150,7E-4	2,12E-03	-3,78E-05	9,15E-04	2,59E-04		1,87E-02		41 247
9,73E+07	181,3E-4	2,09E-03	-3,63E-06	8,87E-04	2,59E-04		2,17E-02		59 184

Figur H.13: Koeffisienter fra forsøket uten bulb.

Knop	Vs	Vm	Rtm	Ctm	Cfm	Fn	RNm
4	2,06	0,45	0,46563	0,010	5,66E-03	0,13	4,36E+05
6	3,09	0,67	1,25136	0,012	5,15E-03	0,20	6,53E+05
7	3,60	0,79	1,63584	0,012	4,98E-03	0,24	7,62E+05
8	4,12	0,90	2,48422	0,013	4,83E-03	0,27	8,71E+05
9	4,63	1,01	4,08355	0,017	4,71E-03	0,30	9,80E+05
10	5,14	1,12	6,09482	0,021	4,60E-03	0,34	1,09E+06

Med Bulb									
RNs	Cr	Cfs	Cf	Ca	Caas		Cts	Rts	
4,01E+07	43,9E-4	2,39E-03	-3,41E-04	1,12E-03	2,58E-04		8,18E-03		3 581
6,01E+07	68,6E-4	2,25E-03	-1,78E-04	1,01E-03	2,58E-04		1,05E-02		10 378
7,01E+07	65,6E-4	2,19E-03	-1,22E-04	9,72E-04	2,58E-04		1,02E-02		13 668
8,01E+07	85,8E-4	2,15E-03	-7,55E-05	9,38E-04	2,58E-04		1,22E-02		21 326
9,02E+07	127,1E-4	2,11E-03	-3,62E-05	9,07E-04	2,58E-04		1,63E-02		36 069
1,00E+08	164,5E-4	2,08E-03	-2,37E-06	8,80E-04	2,58E-04		2,00E-02		54 694

Figur H.14: Koeffisienter fra forsøket med bulb.

Uten Bulb					
Vs [kn]	Cts [-]	Rts [N]	P [kW]	P +15% [kW]	PB
4	8,74E-03	3 811	8	9	15
6	9,70E-03	9 518	29	34	58
7	1,16E-02	15 543	56	64	110
8	1,43E-02	25 011	103	118	202
9	1,87E-02	41 247	191	220	375
10	2,17E-02	59 184	304	350	597

Figur H.15: Fullskalert fra forsøket uten bulb.

Med Bulb					
Vs [kn]	Cts [-]	Rts [N]	P [kW]	P +15% [kW]	PB
4	8,18E-03	3 581	7	8	14
6	1,05E-02	10 378	32	37	63
7	1,02E-02	13 668	49	57	97
8	1,22E-02	21 326	88	101	172
9	1,63E-02	36 069	167	192	328
10	2,00E-02	54 694	281	324	552

Figur H.16: Fullskalert fra forsøket med bulb.

Effektivitet	
Relativ	Besparelse
94 %	-6 %
109 %	9 %
88 %	-12 %
85 %	-15 %
87 %	-13 %
92 %	-8 %

Figur H.17: Relativ differanse og teoretisk besparelse mellom de to testene.

Blockage Eff. Corr

A	1,02	L	1,17
Ax	0,03	b	1,8
m	0,03	B	0,38

V [kn]	V[m/s]	Schuster	Tamura
4	2,06	3 %	1 %
6	3,09	3 %	1 %
7	3,60	3 %	1 %
8	4,12	3 %	1 %
9	4,63	3 %	1 %
10	5,14	3 %	2 %

3.6.4.1 Schuster

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{m}{1 - m - Fr_h^2} + \left(1 - \frac{R_V}{R_T}\right) \frac{2}{3} Fr_h^{10}$$

where $m = A_x/A$, and R_V/R_T is the ratio of viscous to total resistance.

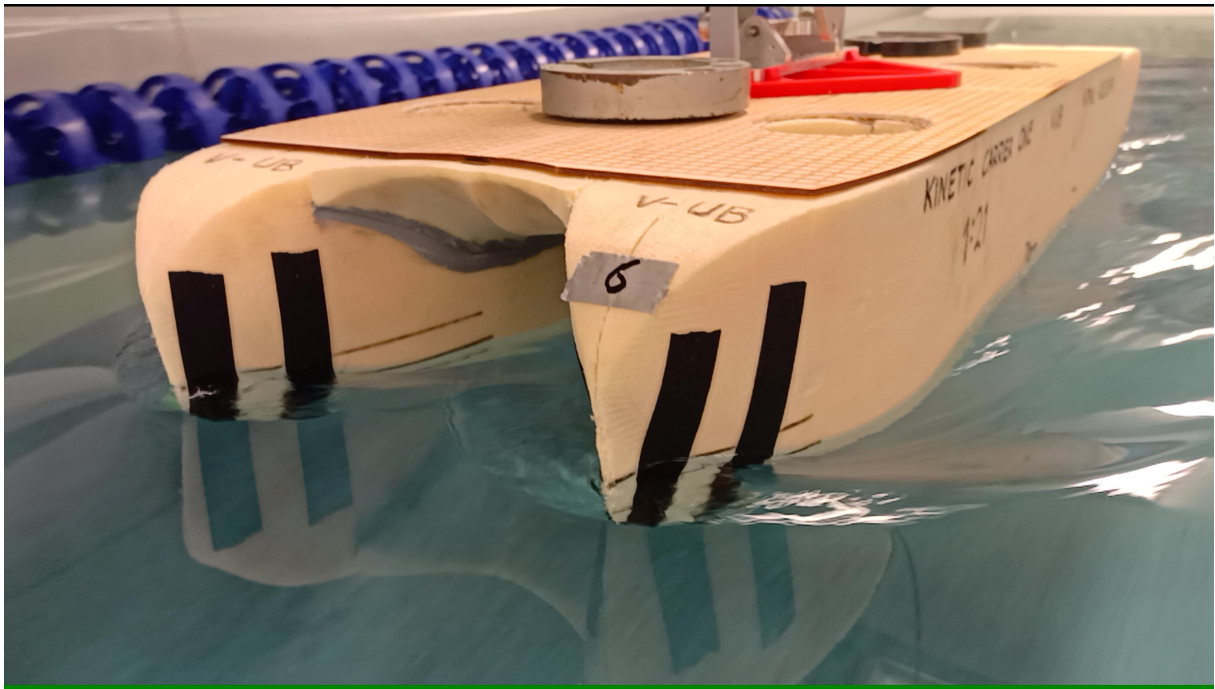
The second term is the finite depth influence on wave making resistance, converted to a speed correction where Fr_h^{10} is a good approximation of the hyperbolic function of the finite depth wave velocity within the range $0 < Fr_h < 0.7$.

3.6.4.3 Tamura

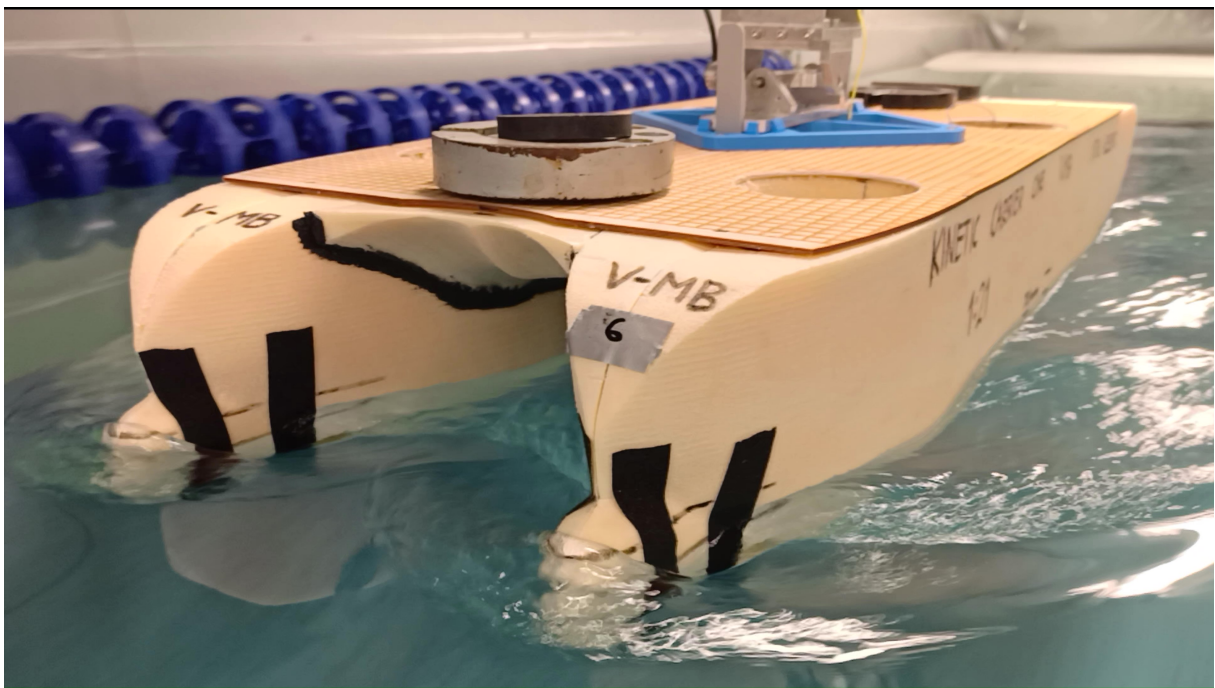
$$\frac{\Delta V}{V} = 0.67m \left[\frac{L}{b}\right]^{\frac{3}{4}} \frac{1}{(1 - Fr_h^2)}$$

where $m = \frac{A_x}{A}$

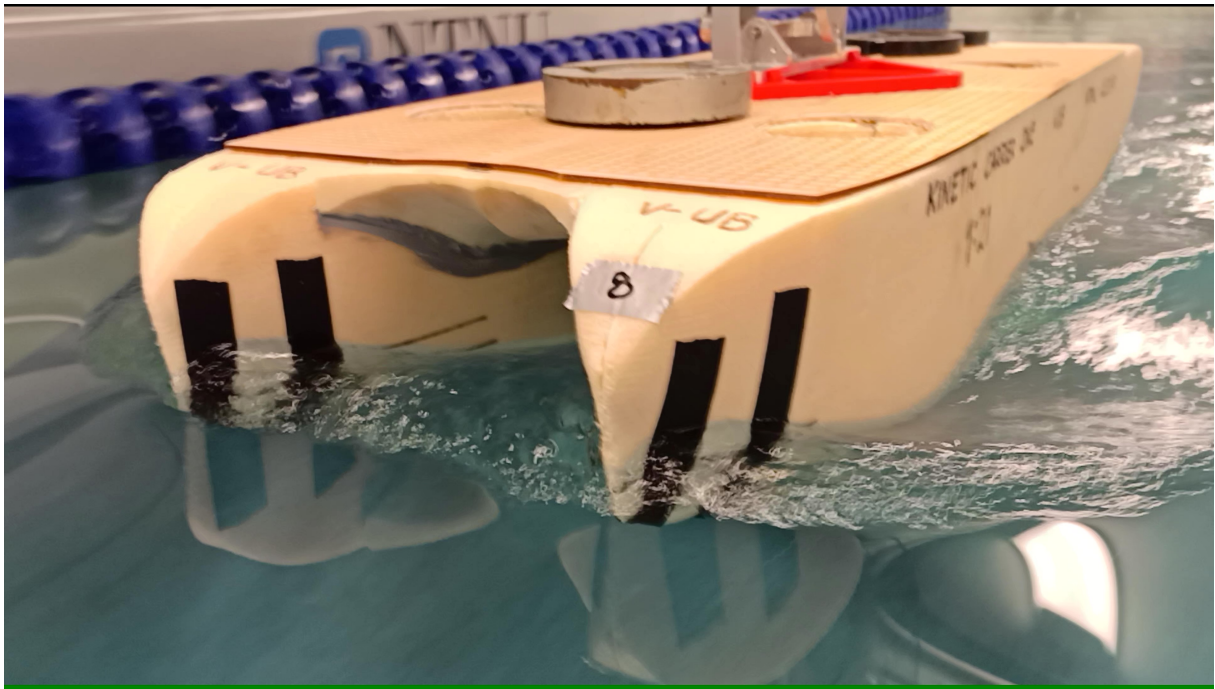
Figur H.18: Beregning av Blockage-Effekt korreksjoner [62].



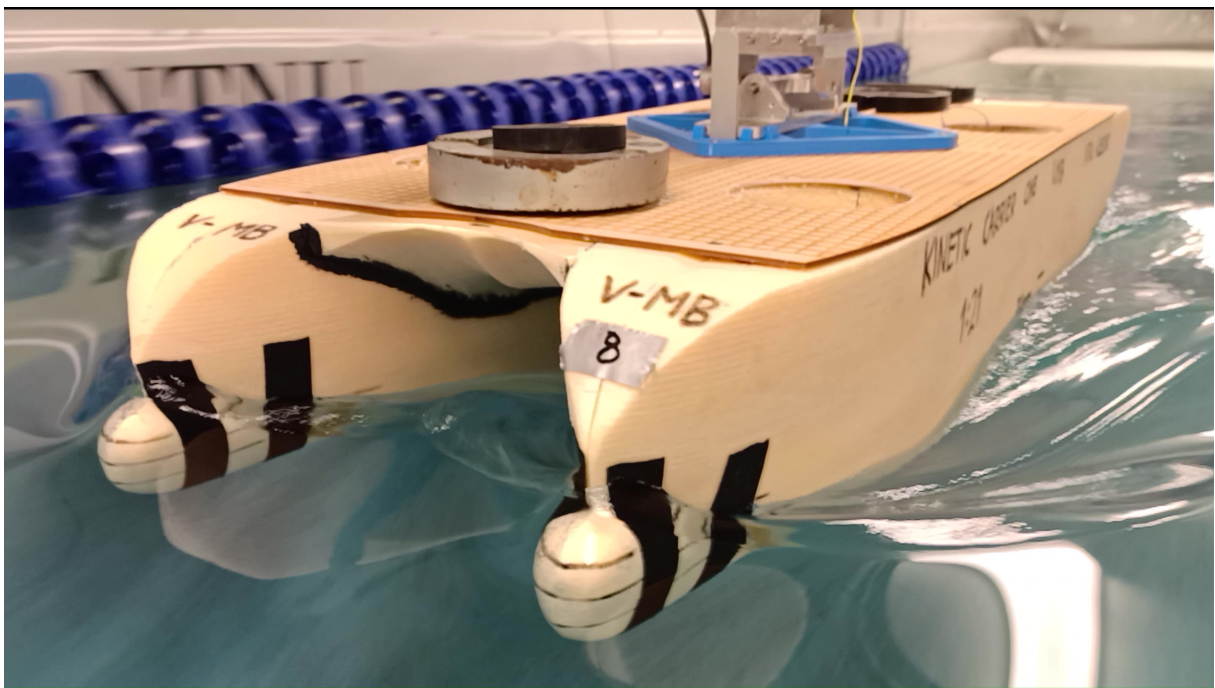
Figur H.19: 6 knop hastighet - Versjon uten bulb.



Figur H.20: 6 knop hastighet - Versjon med bulb.



Figur H.21: 8 knop hastighet - Versjon uten bulb.



Figur H.22: 8 knop hastighet - Versjon med bulb.

I Vekt og Stabilitet

Vektberegning

Bæringsrammer hver 2000mm, antar vi har 10 av disse

Objekt	t [mm]	B [mm]	L [mm]	Sum volum [m ³]	Sum vekt [t]
Bærer toppdekk	20	100	2000	0.0105	0.03857
Vertikal bærer toppdekk	25	700	1000		0.04655
Bærer hoveddekk	25	700	2000		0.0931
Bærer side	12	1200	4000	0.006	0.169176
Bærer bunn	8	1050	3000		0.067032
Bærer innside	25	725	2000		0.096425
Bærer over tunnel	20	500	1000		0.0266
Sum				0.20205	0.537453
				Resultat vekt hele ramme	0.537453
				Resultat vekt halve skrog	5.37

Figur I.1: Vektberegning bærerstruktur

Halve skrogets estimerte materialbruk

Objekt	t [mm]	B [mm]	L [mm]	Sum volum [m ³]	Sum vekt [t]
Ytre skrog	6	3800	24000	0.5472	1.455552
Bunn	6	1700	22000	0.2244	0.596904
Indre skrog	6	2400	22000	0.3168	0.842688
Tunnel tak	6	1000	21000	0.126	0.33516
Langsgående skott	4.5	2000	19000	0.171	0.45486
Hoveddekk	5	5000	20000	0.5	1.33
Bulb	10	2000	2000	0.04	0.1064
Bæringsrammer				0	5.37
Stivere (x43)	5	50	24000	0.258	0.68628
Tverrgående skott (x4)	8		13382927 mm ²	0.428253664	1.139154746
Tverrgående ramme (x3)	8		4300000 mm ²	0.1032	0.274512
Sum				2.715	12.596
				Resultat vekt hele skrog	25.192
				Vekt +20%	30.230

Alu 5086	2.66 t/m ³
----------	-----------------------

Figur I.2: Vektberegning skrogstruktur

Front Skall					Side Skall (per stykk)				
Sandwich estimat	[t/m ³]	t [m]	Areal [m ²]	Vekt [t]	Sandwich estimat	[t/m ³]	t [m]	Areal [m ²]	Vekt [t]
Glassfiber	2.00	0.006	64.08	0.77	Glassfiber	2.00	0.006	32.62	0.39
Skum	0.04	0.024		0.06	Skum	0.04	0.024		0.03
Total tykkelse	0.030				Total tykkelse	0.030			
Total vekt				0.83	Total vekt				0.42

Bakre Skall					Styrhus tak Skall				
Sandwich estimat	[t/m ³]	t [m]	Areal [m ²]	Vekt [t]	Sandwich estimat	[t/m ³]	t [m]	Areal [m ²]	Vekt [t]
Glassfiber	2.00	0.006	46.80	0.56	Glassfiber	2.00	0.006	51.26	0.62
Skum	0.04	0.024		0.04	Skum	0.04	0.024		0.05
Total tykkelse	0.030				Total tykkelse	0.030			
Total vekt				0.61	Total vekt				0.66

Figur I.3: Vektberegning komposittskall i glassfiber

Styrhus estimert materialbruk						
Objekt	t [mm]	B [mm]	L [mm]	Areal [m ²]	Sum volum [m ³]	Sum vekt [t]
Ytre vegger (x2)	5			27.2	0.136	0.36176
Front vegg	5			12.9	0.0645	0.17157
Bakre vagg	5			10.3	0.0515	0.13699
Dørk	5			35.5	0.1775	0.47215
Tak	5			39.4	0.197	0.52402
Vertikal støtte	5	30	90000		0.5805	1.54413
Horisontal støtte	5	40	67000		0.5762	1.532692
Tak skall						0.66
Sum					1.783	5.408
					Vekt +20%	6.489

Figur I.4: Vektberegning styrhusstruktur

Item	Weight [t]	From AP										PS - SB +			
		LCG [m]	Aft lmt.	Fwd lmt.	VCG [m]	Vert bottom lmt.	Vert top lmt.	TCG [m]	Trans left lmt.	Trans right lmt.	LMOM [tm]	VMOM [tm]	TMOM [tm]		
Hull	30.230	9.99			3.00			0.00			302.00	90.69	0.00		
Superstructure	6.489	7.90	4.20	11.60	5.75	4.00	7.50	0.00	-4.00	4.00	51.26	37.31	0.00		
Front shell	0.83	14.65			5.15			0.00			12.16	4.27	0.00		
Rear shell	0.61	1.23			5.20			0.00			0.75	3.17	0.00		
PS shell	0.42	7.00			5.76			-3.06			2.94	2.42	-1.29		
SB shell	0.42	7.00			5.76			3.06			2.94	2.42	1.29		
Azimuth thruster PS	3.40	0.10	-0.30	0.50	1.10	0.10	2.10	-2.50	-2.00	-3.00	0.34	3.74	-8.50		
Azimuth thruster SB	3.40	0.10	-0.30	0.50	1.10	0.10	2.10	2.50	3.00	2.00	0.34	3.74	8.50		
Bow thruster PS	0.70	18.00	17.70	18.30	0.95	0.30	1.60	2.50	2.25	2.75	12.60	0.67	1.75		
Bow thruster SB	0.70	18.00	17.70	18.30	0.95	0.30	1.60	-2.50	-2.75	-2.25	12.60	0.67	-1.75		
Bridge Equipment and interior	1.50	8.30	5.20	11.40	5.95	5.00	6.90	0.00	-3.00	3.00	12.45	8.93	0.00		
Anchor	0.20	18.90	18.70	19.10	4.30	4.00	4.60	0.00	-0.35	0.35	3.78	0.86	0.00		
Windlass	0.30	18.45	18.10	18.80	4.38	4.00	4.75	0.00	-0.50	0.50	5.54	1.31	0.00		
Anchor chain	0.20	17.90	17.40	18.40	3.60	3.40	3.80	0.00	-0.70	0.70	3.58	0.72	0.00		
Generator	1.20	3.58	2.40	4.75	3.95	3.40	4.50	0.00	-0.55	0.55	4.29	4.74	0.00		
Emergency raft	0.08	-0.35	-0.80	0.10	4.35	4.05	4.65	0.00	0.00	0.00	-0.03	0.35	0.00		
24V Batteries	0.10	7.45	7.00	7.90	3.55	3.40	3.70	-0.70	-0.85	-0.55	0.75	0.36	-0.07		
Energy storage cables C (168m)	0.89	8.48	-0.30	17.25	3.20	3.00	3.40	0.00	-1.15	1.15	7.55	2.85	0.00		
Energy storage cables PS (140m)	0.74	10.00	1.00	19.00	2.20	2.00	2.40	-3.25	-3.75	-2.75	7.42	1.63	-2.41		
Energy storage cables SB (140m)	0.74	10.00	1.00	19.00	2.20	2.00	2.40	3.25	2.75	3.75	7.42	1.63	2.41		
Charger systems	2.00	6.35	4.85	7.85	4.15	3.40	4.90	0.00	-3.00	3.00	12.70	8.30	0.00		
Emergency diesel fuel tank	0.50	6.95	6.05	7.85	3.45	3.00	3.90	2.35	2.15	2.55	3.48	1.73	1.18		
Energy Storage PS 1 (6 units)	7.20	4.88	1.85	7.90	3.15	2.40	3.90	-3.25	-3.75	-2.75	35.10	22.68	-23.40		
Energy Storage PS 2 (6 units)	7.20	11.00	8.00	14.00	3.15	2.40	3.90	-3.25	-3.75	-2.75	79.20	22.68	-23.40		
Energy Storage PS 3 (4 units)	4.80	16.10	14.10	18.10	3.15	2.40	3.90	-3.25	-3.75	-2.75	77.28	15.12	-15.60		
Energy Storage SB 1 (6 units)	7.20	4.88	1.85	7.90	3.15	2.40	3.90	3.25	2.75	3.75	35.10	22.68	23.40		
Energy Storage SB 2 (6 units)	7.20	11.00	8.00	14.00	3.15	2.40	3.90	3.25	2.75	3.75	79.20	22.68	23.40		
Energy Storage SB 3 (4 units)	4.80	16.10	14.10	18.10	3.15	2.40	3.90	3.25	2.75	3.75	77.28	15.12	15.60		
Energy Storage PS C Front (9 units)	10.80	12.63	8.00	17.25	4.15	3.40	4.90	-0.65	-1.15	-0.15	136.35	44.82	-7.02		
Energy Storage SB C Front (9 units)	10.80	12.63	8.00	17.25	4.15	3.40	4.90	0.65	0.15	1.15	136.35	44.82	7.02		
Energy Storage PS C Rear (2 units)	2.40	0.63	-0.40	1.65	4.15	3.40	4.90	-0.65	-1.15	-0.15	1.50	9.96	-1.56		
Energy Storage SB C Rear (2 units)	2.40	0.63	-0.40	1.65	4.15	3.40	4.90	0.65	0.15	1.15	1.50	9.96	1.56		
Foundation ES PS	1.49	9.95	1.70	18.20	2.35	2.30	2.40	-3.30	-3.90	-2.70	14.78	3.49	-4.90		
Foundation ES SB	1.49	9.95	1.70	18.20	2.35	2.30	2.40	3.30	2.70	3.90	14.78	3.49	4.90		
Foundation ES C Rear	0.36	2.00	-0.80	4.80	3.35	3.30	3.40	0.00	-1.50	1.50	0.72	1.21	0.00		
Foundation ES C Front	0.84	12.55	7.90	17.20	3.35	3.30	3.40	0.00	-1.50	1.50	10.50	2.80	0.00		
Fixed Ballast PS Bow	3.40	19.67			1.06			-2.50			66.89	3.60	-8.50		
Fixed Ballast SB Bow	3.40	19.67			1.06			2.50			66.89	3.60	8.50		
Total	131.421	9.894			3.281			0.008			1300.26	431.22	1.10		

Figur I.5: Lettskipsvekt-beregning

Stabilitet

1	Draft Amidships m	1,466
2	Displacement t	131,4
3	Heel deg	0,2
4	Draft at FP m	1,466
5	Draft at AP m	1,466
6	Draft at LCF m	1,466
7	Trim (+ve by stern) m	0,000
8	WL Length m	23,190
9	Beam max extents on WL m	7,928
10	Wetted Area m ²	199,075
11	Waterpl. Area m ²	118,513
12	Prismatic coeff. (Cp)	0,706
13	Block coeff. (Cb)	0,640
14	Max Sect. area coeff. (Cm)	0,907
15	Waterpl. area coeff. (Cwp)	0,873
16	LCB from zero pt. (+ve fwd) m	9,968
17	LCF from zero pt. (+ve fwd) m	8,713
18	KB m	0,832
19	KG fluid m	2,769
20	BMt m	6,363
21	BML m	33,372
22	GMt corrected m	4,426
23	GML m	31,435
24	KMt m	7,194
25	KML m	34,203
26	Immersion (TPc) tonne/cm	1,215
27	MTc tonne.m	1,744
28	RM at 1deg = GMt.Disp.sin(1) ton	10,152
29	Max deck inclination deg	0,1972
30	Trim angle (+ve by stern) deg	0,0006

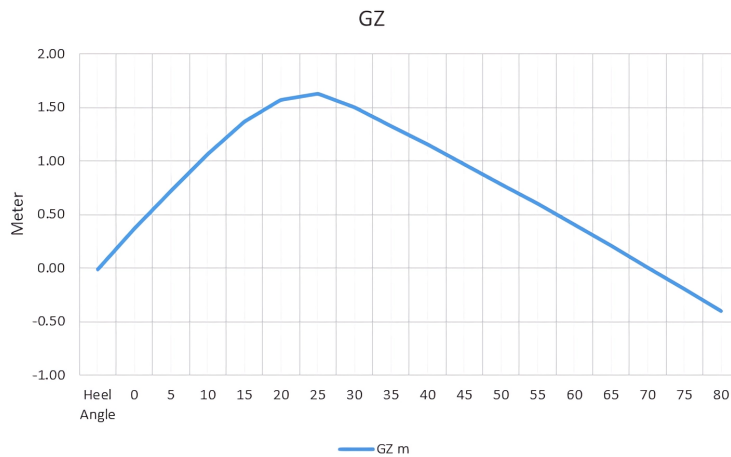
Figur I.6: Hydrostatikk

Heel to Starboard deg	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0
GZ m	-0,015	0,366	0,725	1,064	1,369	1,576	1,630	1,506	1,330	1,152	0,972	0,789	0,602	0,409	0,211	0,009	-0,196	-0,402
Area under GZ curve from zero heel m.deg	0,0000	0,8848	3,6233	8,1035	14,210	21,623	29,715	37,608	44,702	50,906	56,216	60,620	64,099	66,629	68,182	68,735	68,269	66,775
Displacement t	131,4	131,4	131,4	131,4	131,4	131,4	131,4	131,4	131,4	131,4	131,4	131,4	131,4	131,4	131,4	131,4	131,4	131,4
Draft at FP m	1,465	1,477	1,512	1,562	1,614	1,640	1,578	1,335	0,995	0,611	0,184	-0,307	-0,903	-1,680	-2,778	-4,544	-7,993	-18,19
Draft at AP m	1,466	1,441	1,364	1,243	1,075	0,838	0,532	0,195	-0,177	-0,616	-1,156	-1,834	-2,703	-3,876	-5,596	-8,408	-13,95	-30,43
WL Length m	23,163	23,655	23,774	23,790	23,700	23,477	23,411	23,394	23,394	23,392	23,383	23,364	23,336	23,299	23,251	23,191	23,067	22,906
Beam max extents on WL m	7,928	7,949	8,009	8,091	8,091	7,742	7,248	4,476	4,535	4,454	4,427	4,409	4,372	4,302	4,210	4,124	4,056	4,014
Wetted Area m²	199,06	196,95	193,84	191,77	187,63	177,47	162,23	151,99	152,37	153,28	153,94	154,27	154,28	154,42	154,69	154,99	155,24	155,51
Waterpl. Area m²	118,50	116,31	113,19	110,96	106,50	96,069	83,057	76,185	80,174	83,098	84,864	85,296	84,664	83,815	82,620	81,369	80,379	79,782
Prismatic coeff. (Cp)	0,707	0,693	0,689	0,686	0,687	0,693	0,701	0,712	0,712	0,713	0,716	0,719	0,722	0,726	0,731	0,736	0,744	0,752
Block coeff. (Cb)	0,645	0,536	0,459	0,403	0,371	0,378	0,420	0,542	0,520	0,499	0,483	0,502	0,525	0,554	0,591	0,633	0,678	0,720
LCB from zero pt. (+ve fwd) m	9,968	9,971	9,980	9,995	10,016	10,039	10,061	10,070	10,072	10,072	10,076	10,079	10,084	10,088	10,095	10,100	10,105	10,108
LCF from zero pt. (+ve fwd) m	8,714	8,888	9,107	9,222	9,388	9,439	9,131	8,642	8,714	8,651	8,550	8,542	8,666	8,789	8,888	8,959	9,013	9,050
Max deck inclination deg	0,0009	5,0007	10,006	15,018	20,036	25,057	30,072	35,063	40,049	45,038	50,031	55,027	60,023	65,020	70,017	75,013	80,009	85,005
Trim angle (+ve by stern) deg	0,0009	-0,086	-0,357	-0,773	-1,303	-1,937	-2,530	-2,756	-2,832	-2,966	-3,238	-3,687	-4,345	-5,296	-6,783	-9,264	-14,12	-27,31

Figur I.7: Hydrostatikk ved store krengevinkler

	Key point	Type	Immersion angle	Emergence angle
1	Margin Line (immersion pos = 21,15 m)		0	n/a
2	Deck Edge (immersion pos = 21,15 m)		0	n/a
3	DF point	Potential downflooding point	48,4	0
4	DF point	Potential downflooding point	48,4	0

Figur I.8: Downflood point og krengevinkel ved neddykking



Max GZ 1.635 m at 29.10 degree

1.1 Area under the GZ curve

The area (A_1) under the GZ curve up to an angle θ shall be at least:

$$A_1 = 0.055 \times 30^\circ / \theta \quad (\text{m.rad})$$

where θ is the least of the following angles:

- .1 the downflooding angle;
- .2 the angle at which the maximum GZ occurs; and
- .3 30° .

Downflood angle = **48.4** degree

A_1	<	Area under at angle
0.0567		29.7159

Figur I.9: GZ-kurve og krav til areal under kurve

	Code	Criteria	Value	Units	Actual	Status	Margin %
1	C400. Inta	C402.(a). Ratio of GZ(intersection) / GZ (Max)				Pass	
2		Heeling arm = $A \cos^n(\phi)$					
3		A =	0,000	m			
4		n =	2				
5		Phi1, first heel angle, the lesser of...					
6		angle of equilibrium (with heel arm)	0,2	deg	0,2		
7		Phi2, second heel angle, the lesser of...					
8		angle of max. GZ	29,1	deg	29,1		
9		first downflooding angle	n/a	deg			
10		GZ(phi1) / GZ(phi2) shall not be greater than (<=)	60,00	%	0,00	Pass	+100,00
11		Intermediate values					
12		GZ(phi1)		m	0,000		
13		GZ(phi2)		m	1,635		
14							
15	C400. Inta	C402.(b). Angle of Heel at Equilibrium				Pass	
16		Heeling arm = $A \cos^n(\phi)$					
17		A =	0,000	m			
18		n =	2				
19		shall be less than (<)	15,0	deg	0,2	Pass	+98,72
20							
21	C400. Inta	C402.(d). Range of GZ curve.				Pass	
22		Heeling arm = $A \cos^n(\phi)$					
23		A =	0,000	m			
24		n =	2				
25		from the greater of					
26		spec. heel angle	0,0	deg			
27		angle of equilibrium	0,2	deg	0,2		
28		to the lesser of					
29		first downflooding angle	n/a	deg			
30		angle of vanishing stability	75,2	deg	75,2		
31		shall be greater than (>)	70,0	deg	75,0	Pass	+7,19
32							

Figur I.10: Krite-re-godkjenning fra Maxsurf Stability Advanced - I

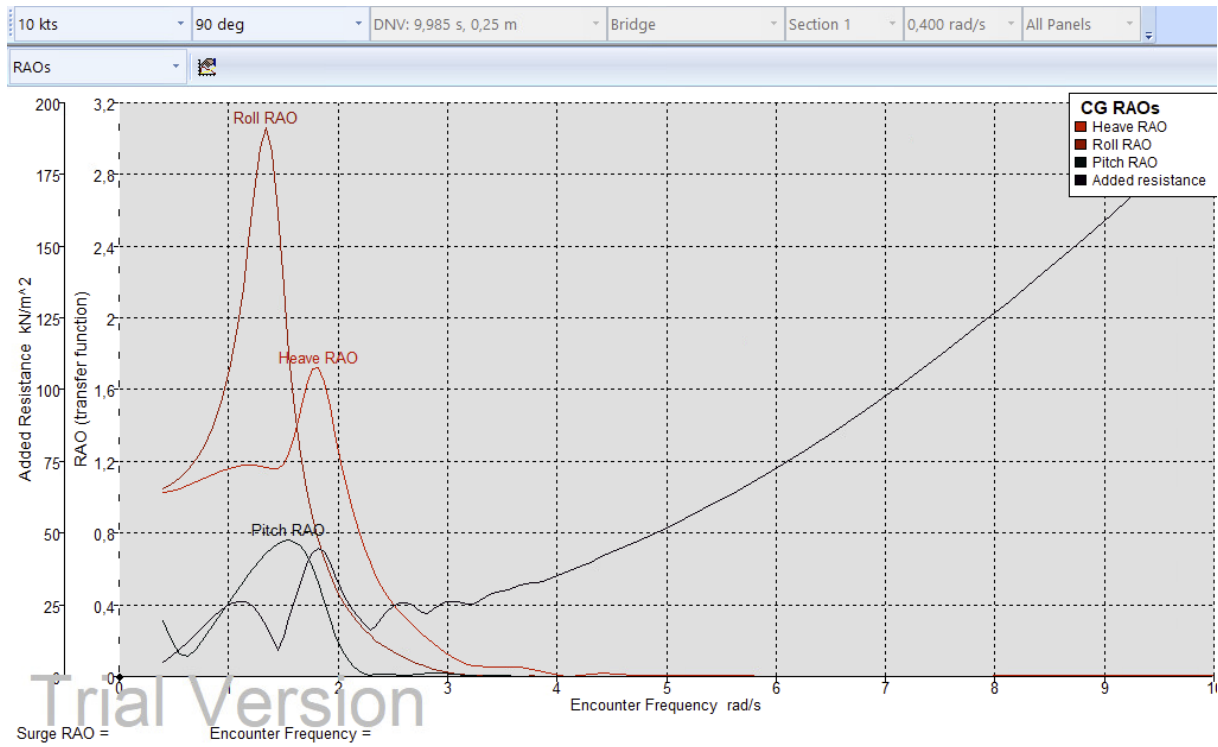
	Code	Criteria	Value	Units	Actual	Status	Margin %
33	HSC 2000	1.1 Area 0 to 30				Pass	
34		from the greater of					
35		spec. heel angle	0,0	deg	0,0		
36		to the lesser of					
37		spec. heel angle	30,0	deg			
38		angle of max. GZ	29,1	deg	29,1		
39		first downflooding angle	n/a	deg			
40		higher heel angle	30,0	deg			
41		required GZ area at higher heel angle	3,1510	m.deg			
42		shall be greater than (>)	3,2495	m.deg	28,2312	Pass	+768,79
43							
44	HSC 2000	1.2 Angle of max. GZ				Pass	
45		shall not be less than (>=)	10,0	deg	29,1	Pass	+190,91
46							
47	HSC 2000	1.5 Area between GZ and HTL				Pass	
48		Pass. crowding arm = $n_{Pass} M / disp. D \cos^n(\phi)$					
49		number of passengers: $n_{Pass} =$	0				
50		passenger mass: $M =$	0,075	tonne			
51		distance from centre line: $D =$	0,000	m			
52		cosine power: $n =$	0				
53		Turn arm: $a v^2 / (R g) h \cos^n(\phi)$					
54		constant: $a =$	1				
55		vessel speed: $v =$	0,000	cts			
56		turn radius: $R =$	200,000	m			
57		$h = KG - \text{mean draft} / 2$	2,036	m			
58		cosine power: $n =$	0				
59		Wind arm: $a P A (h - H) / (g disp.) \cos^n(\phi)$					
60		constant: $a =$	1,50102				
61		wind model	Pressure				
62		wind pressure: $P =$	56,0	Pa			
63		area centroid height (from zero point): $h =$	0,000	m			
64		additional area: $A =$	0,000	m ²			
65		height of lateral resistance: $H =$	0,000	m			
66		cosine power: $n =$	0				
67		Area integrated from the greater of					
68		angle of equilibrium (with heel arm)	0,3, 0,3	deg			
69		to the lesser of					
70		spec. angle above equilibrium (with heel arm)	15,0 (15,3), 15,0 (15,3)	deg			
71		first downflooding angle	n/a	deg			
72		angle of vanishing stability (with heel arm)	75,0, 75,0	deg			
73		Criteria: Area between GZ and heeling arms shall not be less than (>=),				Pass	

Figur I.11: Kritere-godkjenning fra Maxsurf Stability Advanced - II

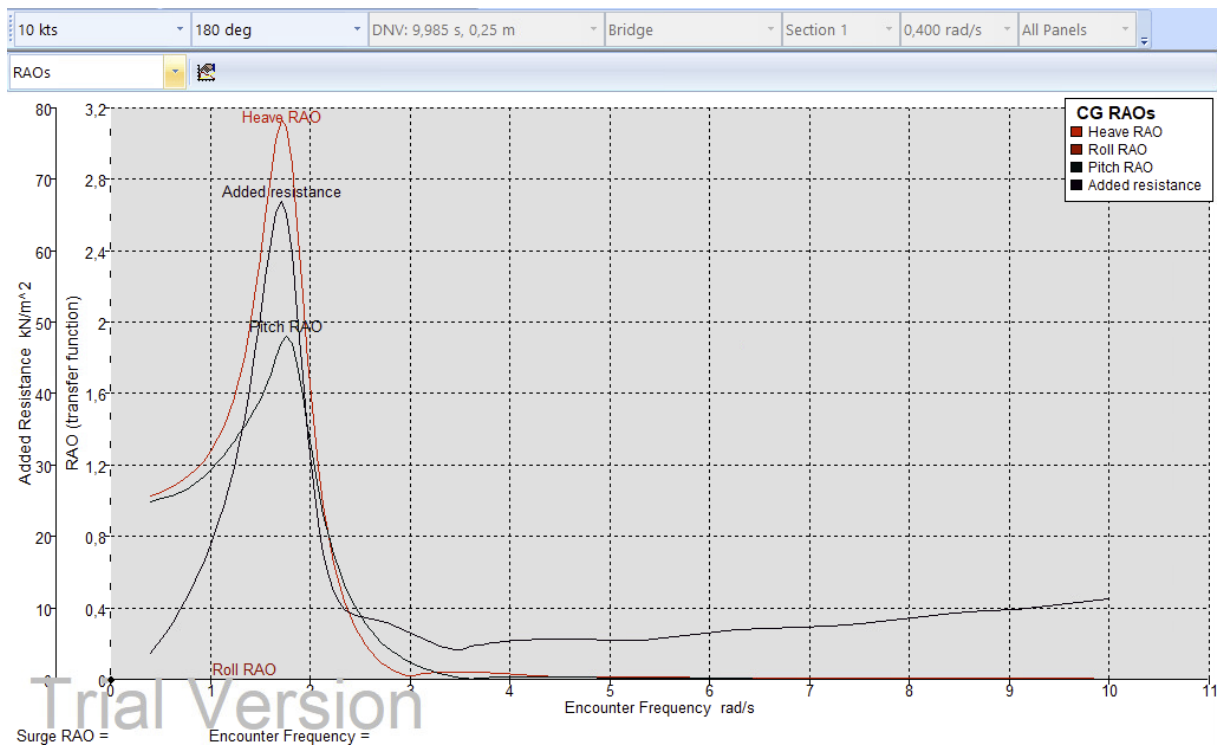
	Code	Criteria	Value	Units	Actual	Status	Margin %
74		Hpc + Hw	1,6040	m.deg	8,2992	Pass	+417,41
75		Ht + Hw	1,6040	m.deg	8,2992	Pass	+417,41
76		<i>Intermediate values</i>					
77		Pass. crowding heel arm amplitude (Hpc)		m	0,000		
78		Turning heel arm amplitude (Ht)		m	0,000		
79		Model windage area		m ²	58,288		
80		Model windage area centroid height (from zero point)		m	2,713		
81		Total windage area		m ²	58,288		
82		Total windage area centroid height (from zero point)		m	2,713		
83		Wind heeling heel arm amplitude (Hw)		m	0,010		
84		Area under GZ curve, from 0,3 to 15,3 deg.		m.deg	8,4540		
85		Area under GZ curve, from 0,3 to 15,3 deg.		m.deg	8,4540		
86		Area under Hpc + Hw, from 0,3 to 15,3 deg.		m.deg	0,1547		
87		Area under Ht + Hw, from 0,3 to 15,3 deg.		m.deg	0,1547		
88							
89	HSC 2000	3.2.1 Angle of equilibrium with gust wind HL2				Pass	
90		<i>Pass. crowding arm = nPass M / disp. D cos^n(phi)</i>					
91		number of passengers: nPass =	0				
92		passenger mass: M =	0,075	tonne			
93		distance from centre line: D =	0,000	m			
94		cosine power: n =	0				
95		<i>Turn arm: a v^2 / (R g) h cos^n(phi)</i>					
96		constant: a =	1				
97		vessel speed: v =	0,000	kts			
98		turn radius: R =	0,000	m			
99		h = KG - mean draft / 2	2,036	m			
100		cosine power: n =	0				
101		<i>Wind arm: a P A (h - H) / (g disp.) cos^n(phi)</i>					
102		constant: a =	1,50102				
103		wind model	Pressure				
104		wind pressure: P =	56,0	Pa			
105		area centroid height (from zero point): h =	0,000	m			
106		additional area: A =	0,000	m ²			
107		H = mean draft / 2	0,733	m			
108		cosine power: n =	0				
109		Criteria: Angle of equilibrium due to the following shall not be greater t				Pass	
110		Wind heeling (Hw)	10,0	deg	0,3	Pass	+97,11
111		<i>Intermediate values</i>					
112		Model windage area		m ²	58,288		
113		Model windage area centroid height (from zero point)		m	2,713		
114		Total windage area		m ²	58,288		

Figur I.12: Kriterer-godkjenning fra Maxsurf Stability Advanced - III

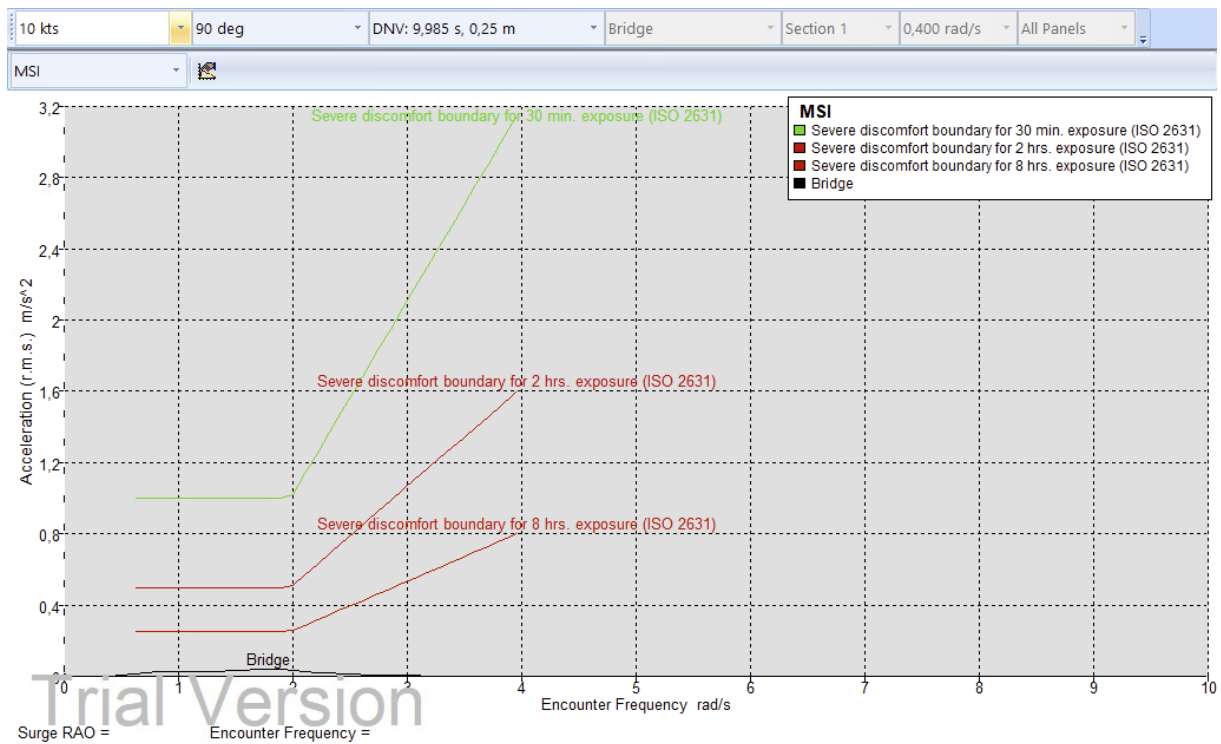
J Seakeeping



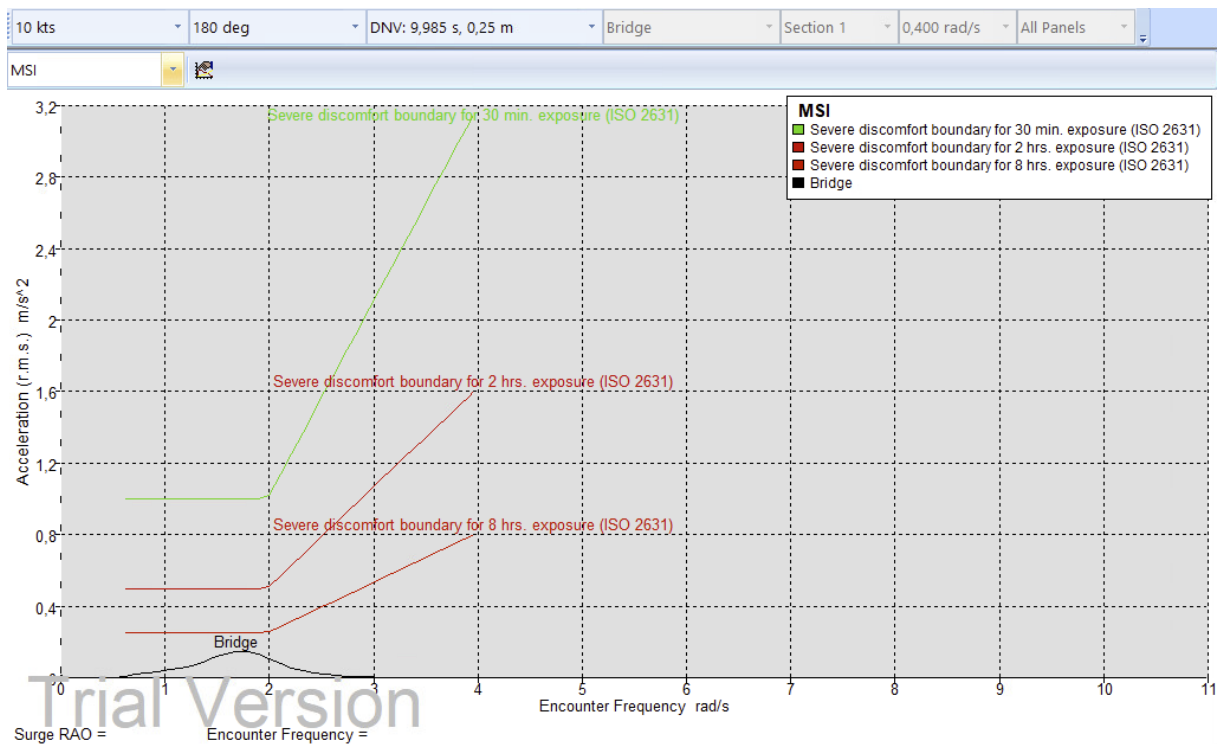
Figur J.1: Response Amplitude Operator for inkommende bølge styrbord med H_s 0,25m.



Figur J.2: Response Amplitude Operator for inkommende bølge forfra med H_s 0,25m.



Figur J.3: Motion Sickness-kontroll for inkommende bølge styrbord med H_s 0,25m.



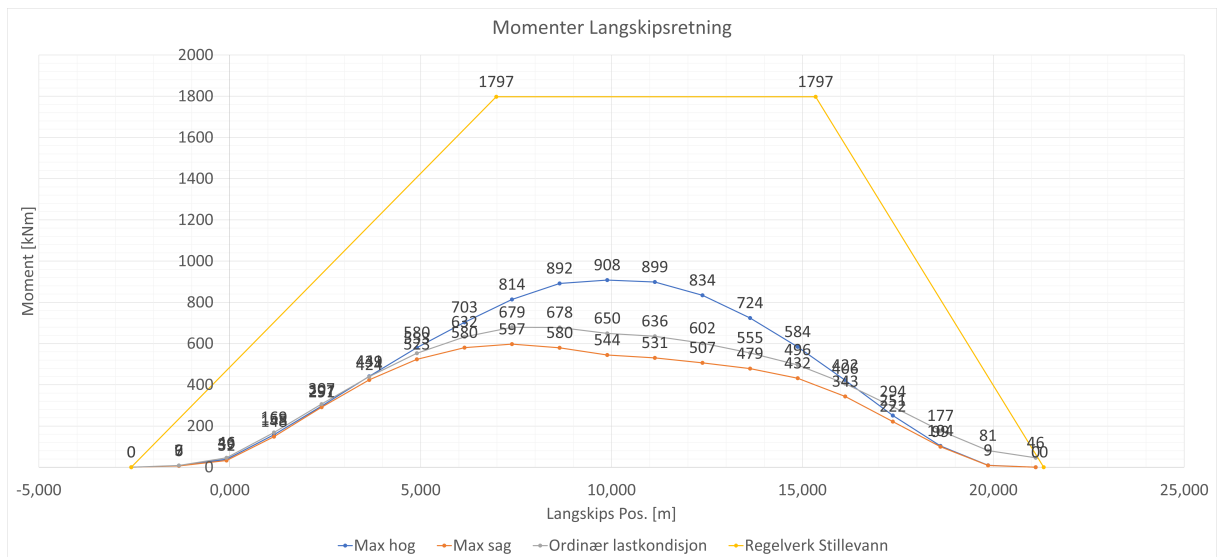
Figur J.4: Motion Sickness-kontroll for inkommende bølge forfra med H_s 0,25m.

K Struktur

Rule length	23,9	//from GA
Moulded breadth of ship	8,0	//from GA
Moulded breadth at waterline	6,0	//from GA
Moulded breadth at waterline L/2	6,0	//from GA
Moulded depth of ship	4,0	//from GA
Scantling draught	1,6	//from Maxsurf
Design slamming draught at FP		
Block coefficient	0,7	//from Maxsurf
Displacement	150,4	//calculated
Maximum service speed	10,0	//based on towing tank results
Wave coefficient	1,2	//calculated
Height of bulkhead deck	4,0	//from GA
Z		
k2	2,9	//from GA
k3	0,3	//DNV
	0,4	//DNV

Msw H	1797	[kNm]
Msw S	0	[kNm]
Mw H	545	[kNm]
Mw S	855	[kNm]
Mtot H	2342	[kNm]
Mtot S	855	[kNm]
Z_top	0,257	[m ³]
Z_bot	0,249	[m ³]
σ_{Top}	9,1	[MPa]
σ_{Bot}	9,4	[MPa]

Figur K.1: Beregninger relatert til global langskipsstyrke.



Figur K.2: Momenter for global langskipsstyrke.

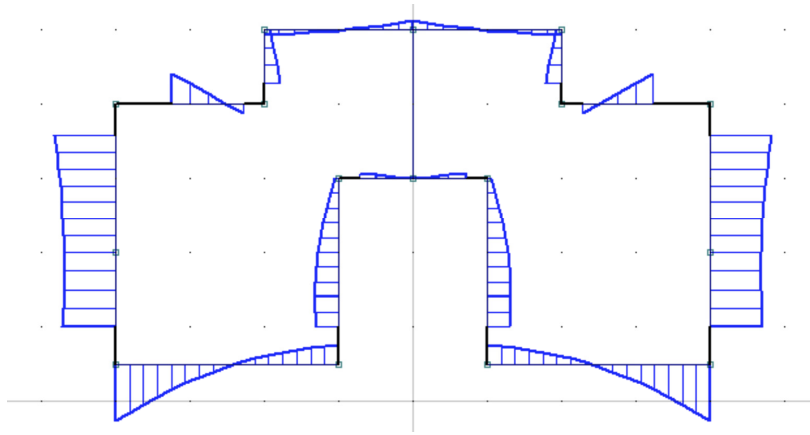
f_l	0,83	C	4	-	s	400	[mm]
σ_y	149	E	70000	$[N/mm^2]$	t	6	[mm]
		v	0,33	-	π	3,14	-

Gjelder platefeltene med lineære spenninger i toppdekt og bunn

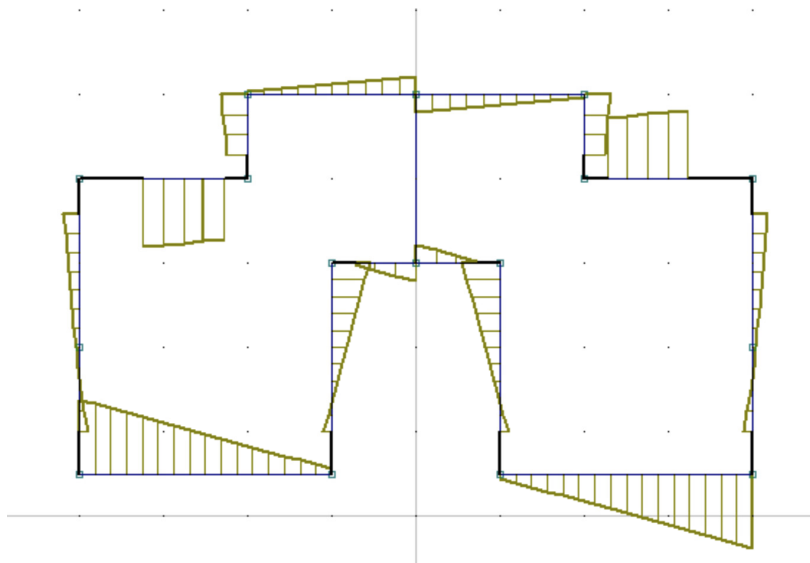
Lokasjon	Spenning	Bulekapasitet	Utnyttelse
σ_{Top}	9,1	58	15,7 %
σ_{Bot}	9,4	58	16,2 %

σ_{EULER}	58
$\sigma/2$	75

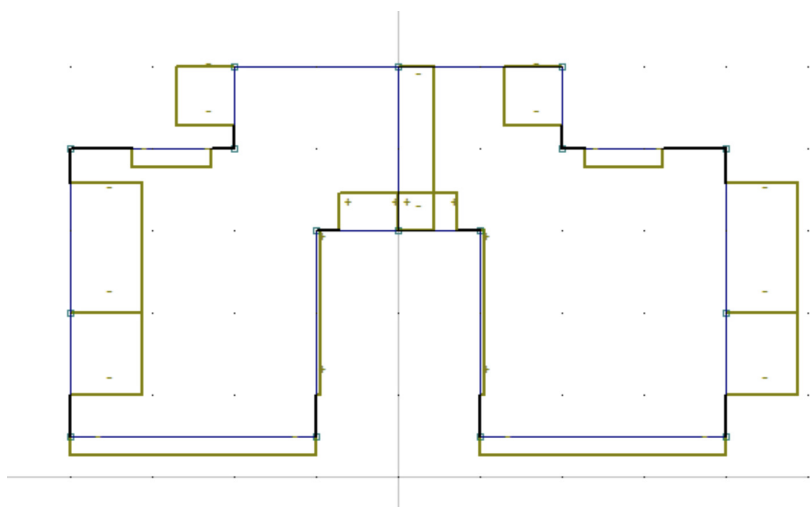
Figur K.3: Beregninger relatert til buling i global langskipsstyrke.



Figur K.7: Momentdiagram for bælingsrammene.



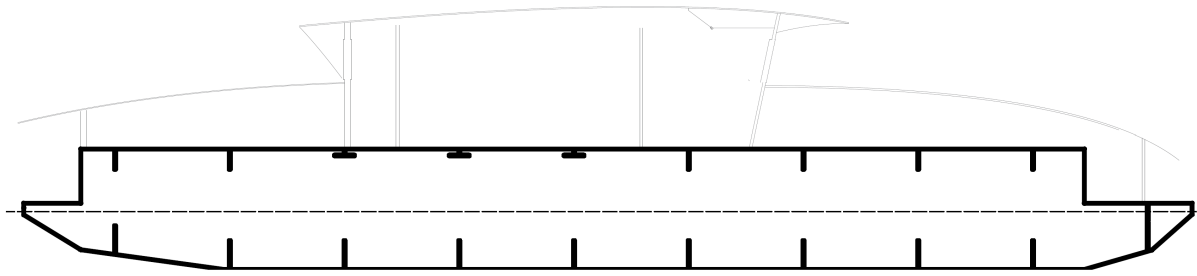
Figur K.8: Skjærkraftdiagram for bælingsrammene.



Figur K.9: Normalkraftdiagram for bælingsrammene.

Bærerprofiler fra 3D-Beam										
	<i>Ytre hud</i>		<i>Steg</i>		<i>Indre flens</i>		<i>Effektiv flens</i>			
	t [mm]	h [mm]	t [mm]	h [mm]	t [mm]	h [mm]	Avgjort av bjelkens spenn og bredde			
Lokasjon:										
Bunn	6	1050	8	1000	5	1050	1050			
Side utvendig	6	1340	12	1200	15	100	1340			
Side tunnel	6	760	25	700	0	0	760			
Tunneltak	6	200	20	500	0	0	760			
Hoveddekk	6	760	25	700	0	0	760			
Vertikal bærer	6	380	25	700	0	0	380			
Toppdekk over teknisk	6	760	20	100	15	350	760			
Toppdekk over svinghjul	6	760	20	300	0	0	760			
Langsgående senter	5	200	4,5	570	5	200	570			

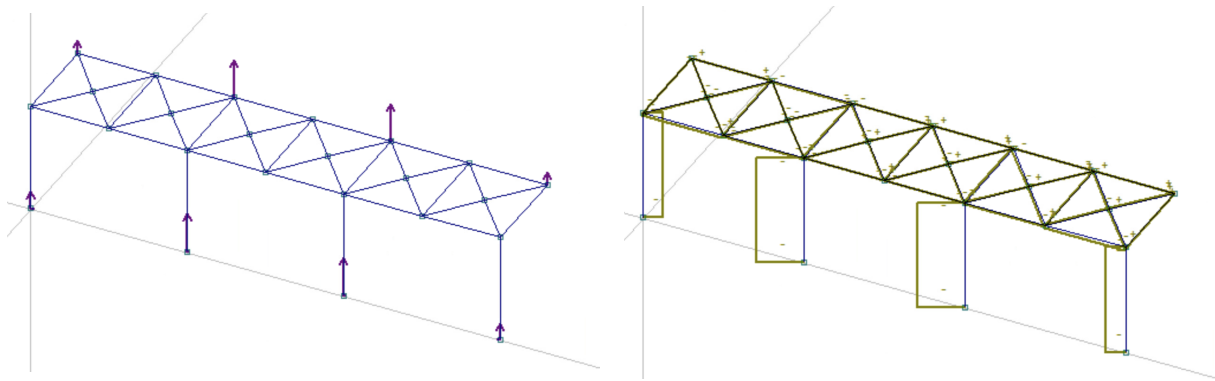
Figur K.10: Bærerprofilene til bæringsrammene.



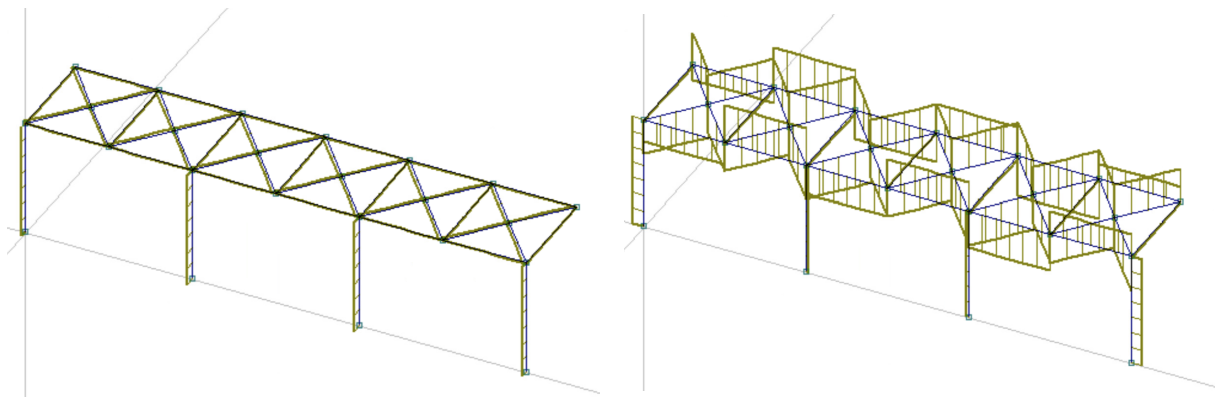
Figur K.11: Profil til global tverskipsstyrke.

Moment fra Regelverk		
M_t	922,0	kNm
Tverrsnittsdata:		
NA	1009,4	mm
I_y	64 182 000 000 000	mm ⁴
I_x	786 530 000 000	mm ⁴
Egenskaper fra tverrsnittsdata:		
W_{top}	0,721	m ³
W_{bot}	0,779	m ³
Resulterende spenninger med M_t		
σ_{Top}	1,278	MPa
σ_{Bot}	1,183	MPa

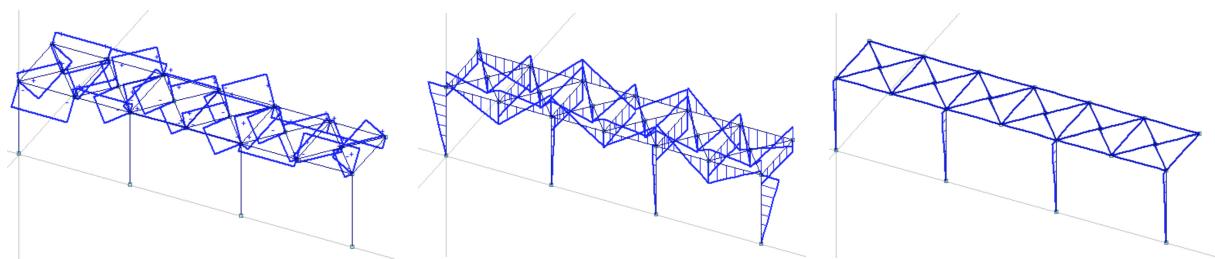
Figur K.12: Beregninger til global tverskipsstyrke.



Figur K.13: Responser i innfestningspunkter til venstre og normalkraftdiagram til høyre for bærrsystemet til svinghjul.

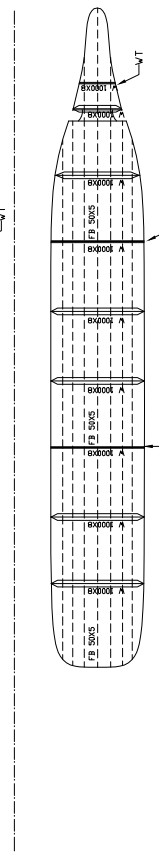
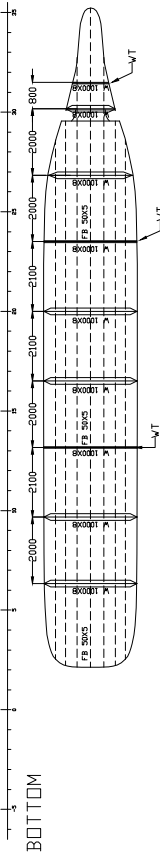
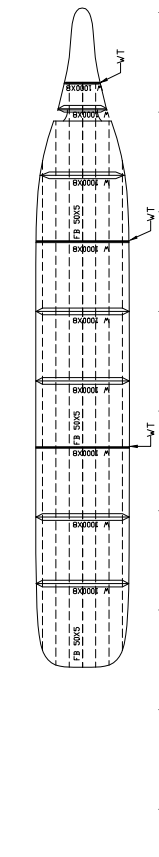
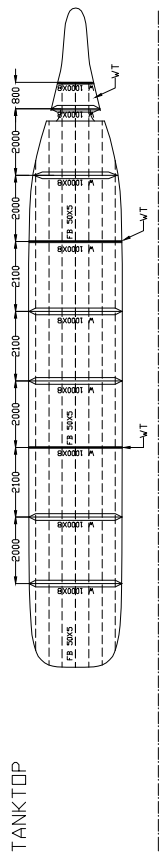
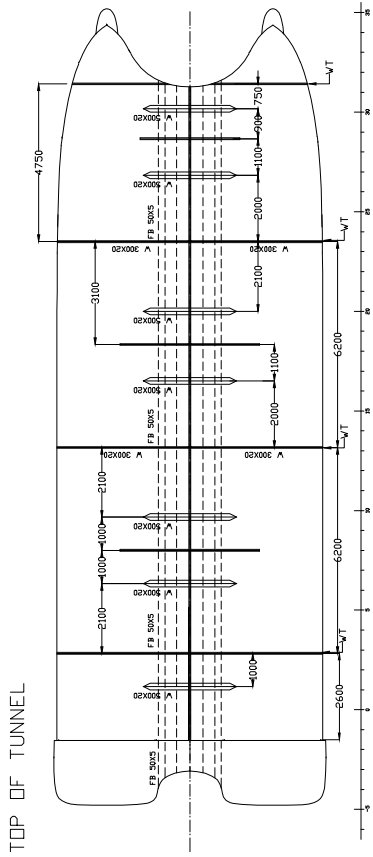
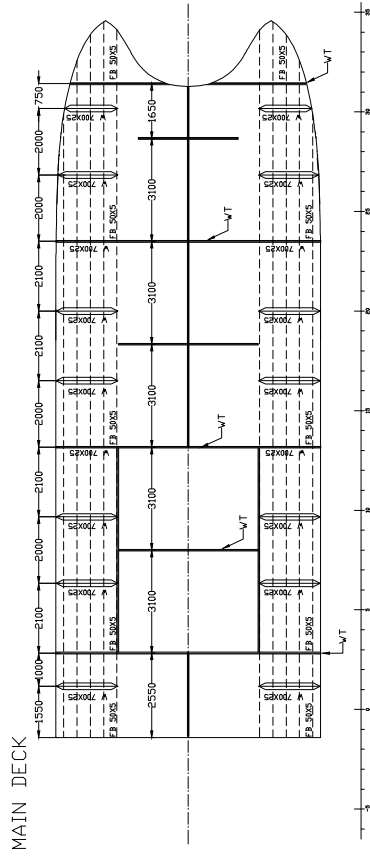
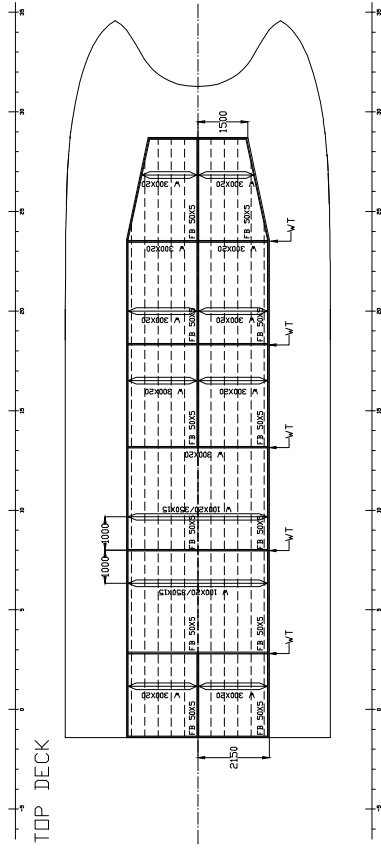


Figur K.14: Skjærkraftdiagram for bærrsystemet til svinghjul. Y-retning til venstre og Z-retning til høyre.



Figur K.15: Momentdiagram for bærrsystemet til svinghjul. Torsjon i X-retning til venstre, moment i Y-retning på midten og moment i Z-retning til høyre.

Klassetegninger



Blom: 08452023	Drawn by: L.V. LARSEN	Designed by: H.J. ARSEN & H.J. SYEEN	NTNU	
			NO. 1000	NO. 1000
			Ex-02	Ex-03
PROFILES & DECK PLANS			KINETIC CARRIER ONE	

L Kostnader

Sum	99,884,800 NOK	
Sum exl. ES	35,084,800 NOK	35% av totale kostnad
Sum ES	64,800,000 NOK	65% av totale kostnad

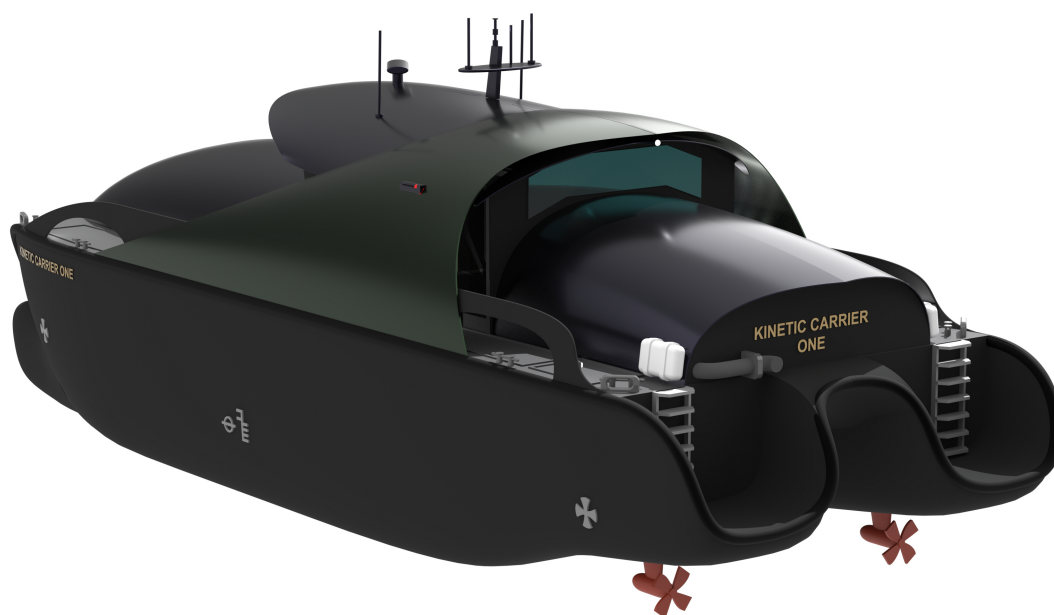
Item	Price per unit [NOK]	Units	Total Price [NOK]
Hull material	1,300,000	1	1,300,000
Hull labor	5,000,000	1	5,000,000
Superstructure	300,000	1	300,000
Superstructure labor	500,000	1	500,000
Shell	800,000	1	800,000
Azimuth Thruster	2,000,000	2	4,000,000
Bow thruster	500,000	2	1,000,000
Propulsion electrical systems	1,043,200	1	1,043,200
Bridge Equipment and sensor	3,650,000	1	3,650,000
Bridge interior	362,000	1	362,000
Safety equipment	250,000	1	250,000
Anchor	100,000	1	100,000
Windlass	200,000	1	200,000
Anchor chain	100,000	1	100,000
Generator	880,000	1	880,000
Emergency raft	20,000	2	40,000
12V Batteries	5,500	4	22,000
Energy storage cables C	1,200	168	201,600
Energy storage cables PS	1,200	140	168,000
Energy storage cables SB	1,200	140	168,000
Charger systems	5,000,000	1	5,000,000
Transformator	10,000,000	1	10,000,000
Energy Storage (54 units)	1,200,000	54	64,800,000

Figur L.1: Estimerte konstruksjon- og installasjonskostnader

M Renders Rhinoceros3D



Figur M.1: 3D-perspektiv fremre styrbord.



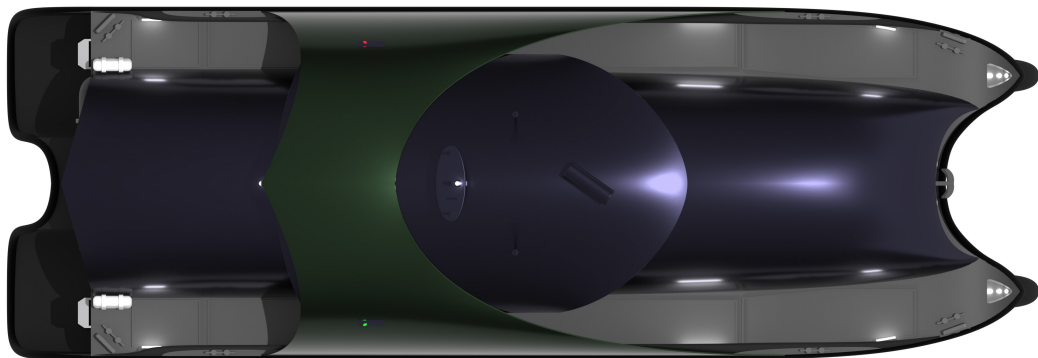
Figur M.2: 3D-perspektiv akter babord.



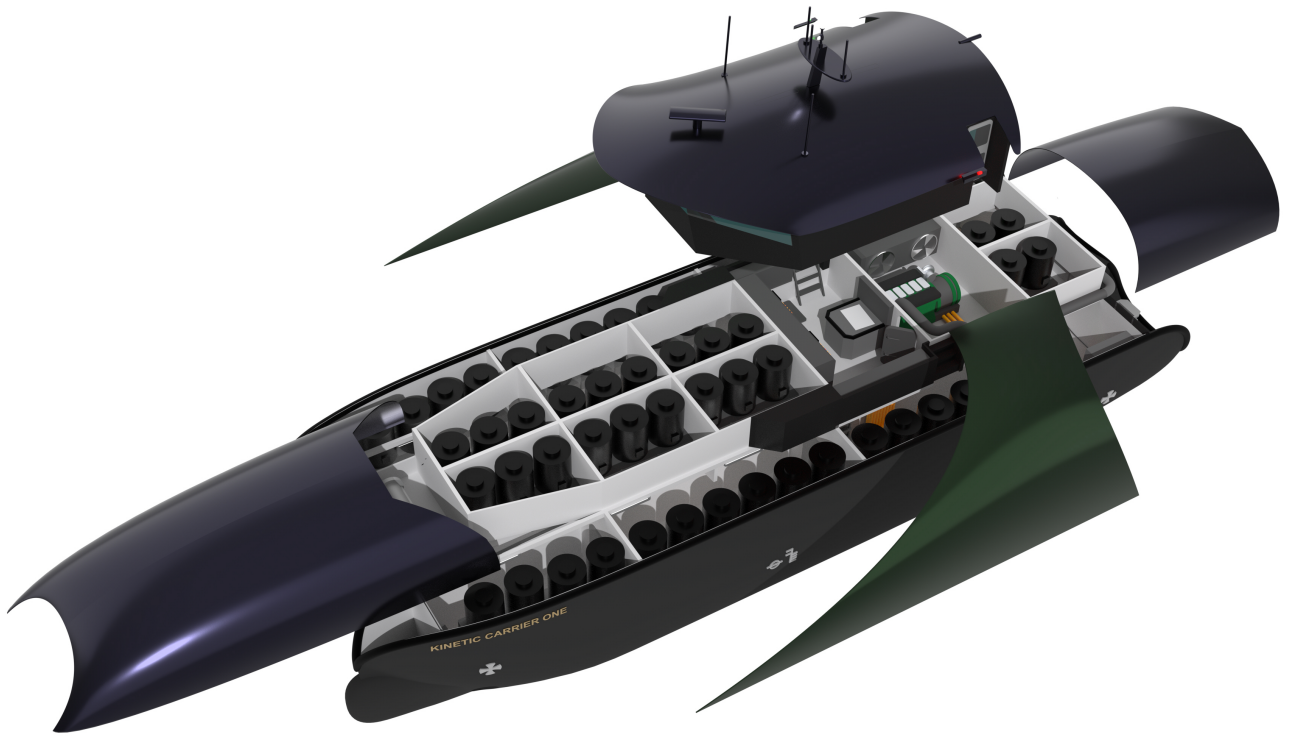
Figur M.3: Forut og Akterut.



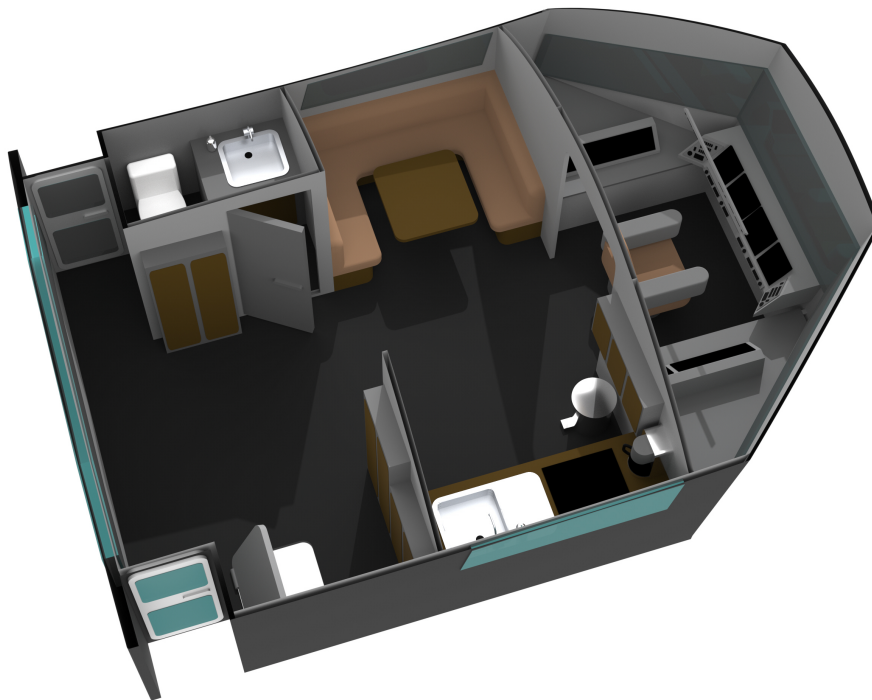
Figur M.4: Sideperspektiv.



Figur M.5: Plan ovenfra.



Figur M.6: Innvendig struktur.



Figur M.7: Interiør bro.



