

Batteridrift på alle hurtigbåtruter i Trøndelag

Rapport fra utviklingskontrakt for fremtidens hurtigbåt
Flying Foil, Brødrene Aa, Westcon Power and Automation og NTNU



BRØDRENE AA



WESTCON[®]
POWER & AUTOMATION

 **NTNU**

FORORD

Denne rapporten er skrevet som et resultat av samarbeidet mellom Flying Foil AS, Brødrene Aa AS, Westcon Power & Automation AS og NTNU. Hovedforfatteren av teksten i dette dokumentet er Flying Foil AS, representert ved John Martin Kleven Godø (john.martin@flyingfoil.no) og Jarle Vinje Kramer (jarle@flyingfoil.no)

Deler av dette dokumentet inneholder sensitiv informasjon. Det finnes derfor to versjoner av denne teksten; en hvor all informasjon er vist, ment for komiteen til utviklingskontrakten, og en versjon hvor sensitiv informasjon er sladdet.

Sladdet tekst og bilder ser slik ut:



Sammendrag

Utviklingskontrakt for fremtidens hurtigbåt søker svar på spørsmålet:

Kan man kjøre de tre hurtigbåtrutene Trondheim-Vanvikan (16km), Trondheim-Brekstad (53km) og Trondheim-Kristiansund (176km) med nullutslipps hurtigbåter?

Denne rapporten søker å besvare dette spørsmålet, og er et resultat av et samarbeidsprosjekt mellom Flying Foil, Brødrene Aa, Westcon Power & Automation og NTNU. Målet med dette prosjektet var å lage en ny generasjon hydrofoil fartøy, bygget av karbonfiber med forbedret energieffektivitet i forhold til både tidligere hydrofoilbåter og dagens hurtigbåter.

To fartøyer har blitt designet og prosjektert: et 20 m langt fartøy med 129 seter for Trondheim-Vanvikan, og et 30 meter langt fartøy med 270 seter for de resterende rutene. Både batteri- og hydrogendrift har vært vurdert, med den konklusjonen at batteridrift virker å være det foretrukne alternativet for alle rutene. Konklusjonen er basert på økonomiske beregninger som viser at kostnader knyttet til kraftforsyning – drift og investeringskostnader – reduseres med 50% ved å gå for en batteriløsning over hydrogen. Forskjellen i tilsvarende kostander for en hydrofoil-batteribåt og en konvensjonell hydrogenkatamaran er estimert til å være 62% i favør hydrofoilbåten.

For å muliggjøre batteridrift på den lengste ruta har vi designet et energieffektivt hydrofoilsystem for 40 knops hastighet. Dette gjør at vi kan spare inn en halv time kjøring relativt til dagens hastighet på 33 knop. Økt hastighet benyttes for å gi bedre tid til batterilading halvveis på strekningen. For passasjerer som benytter den nordligste delen av kystekspresen – mellom Trondheim og Hitra – vil reisetiden bli redusert. For de som tar båten hele veien mellom Trondheim og Kristiansund vil reisetiden være uendret. En hastighetsøkning fra 33 knop til 40 knop ville for en konvensjonell hurtigbåt bety en økning i energiforbruk på omtrent 50%. Ved å benytte omfattende optimaliseringsmetoder for hydrofoilsystemet kan man oppnå minimal motstand for en gitt vekt og hastighet. Dette muliggjør en reduksjon av energiforbruk på omtrent 30% relativt til dagens båter i 33 knop, selv om hastigheten øker til 40 knop. Fordi energieffektive fartøy muliggjør lettere kraftforsyning er forskjellen i energieffektiviteten mellom en konvensjonell batteribåt og en hydrofoil-batteribåt opp til 40%.

Konsortiet har utviklet en sjøgangssimulator og optimalisert fartøyenes flykontrollsystemer for drift i de sjøtilstandene som har vært målt på rutene det siste året. Statistikk for passasjerkomfort og regularitet har så blitt beregnet med reelle værddata. Passasjerene i et hydrofoil fartøy er estimert til å oppleve 88% lavere akselerasjoner enn i et konvensjonelt fartøy, noe som i teorien eliminerer sjøsyke. Dette til tross for en hastighetsøkning fra 33 til 40 knop.

Alle nye fartøydesign bærer med seg nye utfordringer relativt til konvensjonelle båter. En HAZID-analyse har blitt gjennomført i samarbeid med Sjøfartsdirektoratet, for å avdekke sikkerhetsutfordringer.

Innholdsfortegnelse

Forord	2
Sammendrag	3
Innholdsfortegnelse	4
Innledning	7
Utfordringen	7
Arbeidet som har blitt gjort	10
Ikke dekket av denne rapporten	11
Veien videre	11
Tidligere hydrofoilbåter	12
Overordnet beskrivelse av vårt fartøykonsept	16
Oppsummering av designkrav	16
Hvordan greier vi batteridrift på alle rutene i Trøndelag?	17
Skipsplattform fra Brødrene Aa	17
Hoveddimensjoner	18
Vekt av en hurtigbåt	18
Dekksplan	19
Energiforbruk	20
Vingedesign	21
Generell beskrivelse av vingeoppsett	23
Energieffektiv og stabil flykonfigurasjon av vinger	23
Spesialdesignede foilprofiler	25
Minimering av løft-indusert motstand	26
Optimering av design ved hjelp av spesialutviklet programvare	28
Motstand og energiforbruk	30
Simuleringsparametere	31
Resultater fra CFD analyse	33
Vingekonstruksjon	35
Vingestruktur	35
Globale belastninger	38
Kavitasjonserosjon	39
Kontrollsystem OG sjøegenskaper	42
Kontrollsystem	42
Sensorpakke	42
Kontrollprogramvare	43
Servomotorer	44
Mekanisk system	44
Redundans og sikkerhet	46
Flysimulator	48
Krefter	49

Bevegelser	49
Kontroller.....	49
Sjøegenskaper	49
Fremdriftssystem	60
Kravspesifikasjon.....	60
Høy propulsjonsvirkningsgrad i marsjfart	60
Stor skyvkraft ved take-off	60
Manøvrering ved sakte fart	60
Robusthet og lavt vedlikeholdsbehov.....	60
Evaluerte alternativer	60
Motor over vann, propell under vann	61
Motor og propell under vann	61
Motor og propell over vann.....	62
Luftpropulsjon	63
Flyer Thrust Unit	64
Design	65
Elektriske hovedmotorer	69
Kraftforsyning	70
Batterier	71
Generelt om batterier for maritim bruk	71
Potensiale i fremtiden	75
Kraftforsyningssystemet i dette prosjektet	76
Hydrogen	80
Vekt av hydrogenbasert kraftforsyning	80
Hydrogensystemet beregnet i dette prosjektet	84
Dimensjonering av kraftsystem	85
Rutedata	85
Forklaring av beregninger.....	87
Resultater	88
Økonomi.....	92
Hva koster en hurtigbåt?	92
Datagrunnlag og antakelser	93
Innkjøpskostnader	93
Driftskostnader	96
Resultater	97
Trondheim – Kristiansund.....	97
Trondheim – Brekstad	99
Trondheim – Vanvikan.....	100
Sikkerhet	103
Batteribrann.....	103
Tom for strøm	104
Feil på kraftforsyningssystemet.....	104

Kollisjon med andre skip	104
Problem med fremdriftsløsningen	104
Kollisjon med flytende objekter i vannet	104
Feil på sensormålinger eller datamaskintrøbbel.....	105
Feil på aktueringsmaskineriet	105
Generell løsning på de fleste problemer knyttet til flyging	106
Prototype – fysisk verifisering av teori	107
Konklusjon.....	115
Bibliography.....	116
Appendix	120

INNLEDNING

Som et ledd i sitt arbeid med å oppfylle fylkeskommunale forpliktelser om reduserte CO2-utslipp har Trøndelag Fylke initiert «Utviklingskontrakt for fremtidens hurtigbåt». Prosjektet gjennomføres i forkant av kommende anbudsrunde for hurtigbåtdrift i fylket, med planlagt oppstart i år 2022. Målet med utviklingskontrakten er å finne ut hvorvidt det er teknisk og økonomisk mulig å stille krav om nullutslippsdrift av alle hurtigbåtrutene i Trøndelag. Det oppfordres til radikal nytenking, og visjonen for utviklingskontrakten uttaler blant annet at man ønsker å «.... initiere utvikling av en teknologi som ikke eksisterer og som industrien ikke vet om de får til å levere». Denne rapporten er sluttresultatet av arbeid gjennomført av Flying Foil, Brødrene Aa, Westcon Power & Automation og NTNU, i sin posisjon som et av konsortiene som har fått anledning til å gjennomføre utviklingskontrakt for Trøndelag Fylke. Arbeidet er gjennomført i tidsrommet 1. september 2018 til 2. september 2019.

Utgangspunktet for vårt arbeid er at vi ønsket å evaluere potensialet for kostnadseffektive nullutslipps hurtigbåter basert på moderne hydrofoilteknologi, lettvkts byggemetoder med karbonfiberkompositt, og moderne batteri- og hydrogendrift. Konsortiet er sammensatt med dette i tankene, der hver deltakerbedrift har tung kompetanse innen et av disse fagområdene.



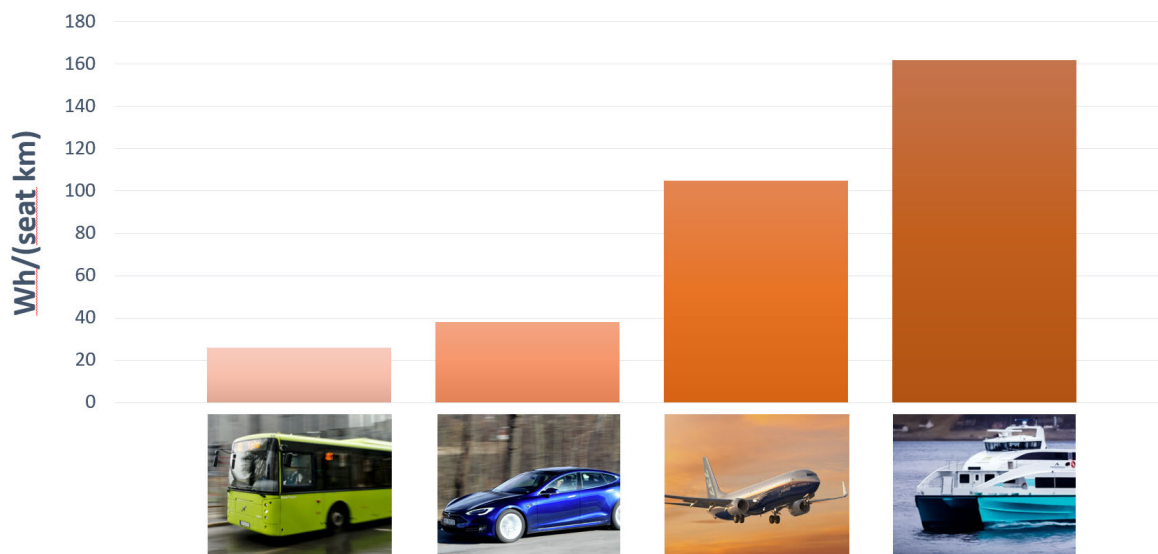
Figur 1: Målet med dette prosjektet har vært å kombinere moderne karbonfiberkatamaraner med flyteknologi (hydrofoiler) og nullutslippskraftforsyning

Rapporten søker å belyse både de tekniske og de økonomiske sidene av nullutslippsdrift av hurtigbåter, og i korte trekk besvarer den to spørsmål:

- 1 Er det mulig med nullutslippsdrift på Trøndelags hurtigbåtruter?
- 2 Hva vil dette eventuelt koste?

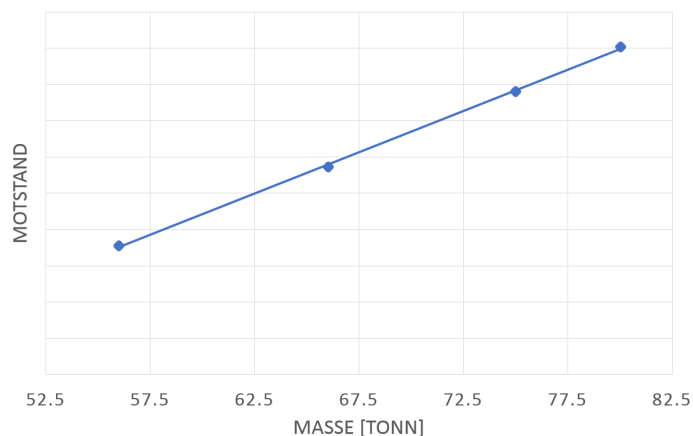
Utfordringen

I en verden med elektrifisering av stadig flere transportmetoder kan man raskt tenke at det kanskje ikke er nødvendig å stille spørsmål ved hvorvidt elektrifisering av hurtigbåt er mulig. Det er imidlertid to gode grunner til at man bør stille dette spørsmålet; at hurtigbåter har svært høyt energiforbruk per utreist distanse, og at energibruken per distanse er direkte korrelert med fartøyets vekt.



Figur 2: Energibruk per setekilometer for ulike transportmetoder

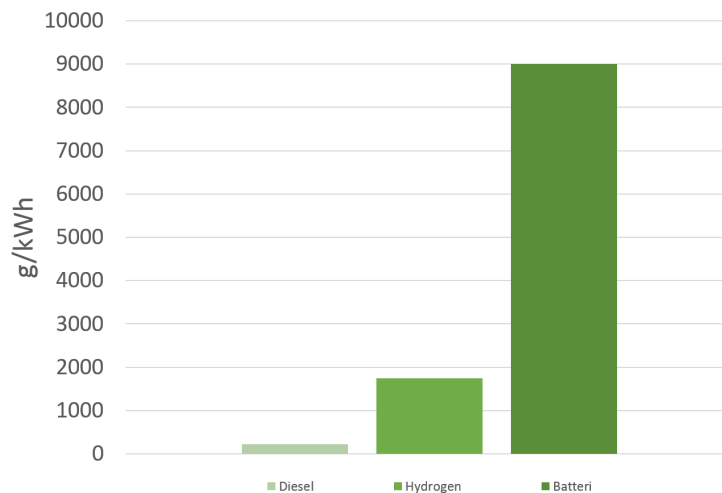
På grunn av grunnleggende fysiske begrensninger knyttet til tetthet og viskositet til vann er alle kjente havgående hurtiggående transportmetoder svært energikrevende. Hurtigbåter har vært gjennom en stor utvikling de siste 20 årene, med konstruksjon av lettvekts karbonfibermaterialer og optimalisering av skroggeometri. Likevel er energibehovet per setekilometer høyere enn for alle andre typiske transportmetoder, 50% høyere enn for jetfly, og mer enn 300% høyere enn for en personbil. Fartøyet må derfor bære med seg vesentlig mer energi, enten dette er i form av diesel, batterier, hydrogen eller andre energibærere, enn noen andre transportmidler. Forholdet mellom energibehov per setekilometer er illustrert i Figur 2.



Figur 3: Motstand som funksjon av fartøyvekt for et typisk hurtigbåtskrog. Punkter er resultater fra CFD-simuleringer mens linjen er en lineær tilnærming til resultatene. Y-aksen er fjernet av konfidensialitetshensyn.

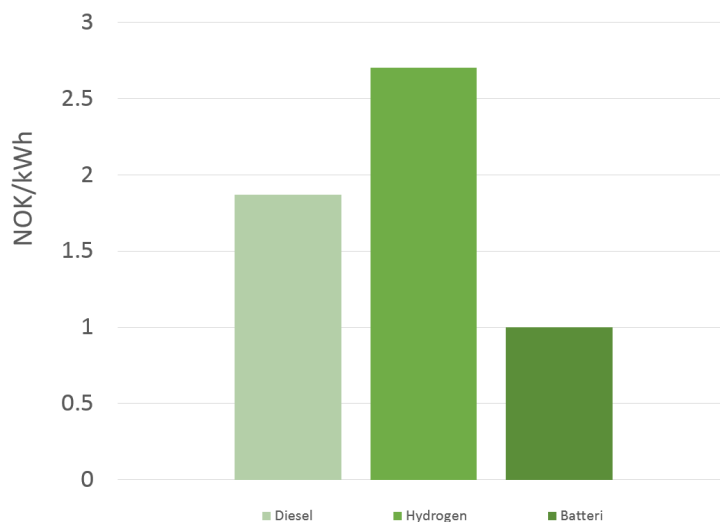
Ved siden av å ha et høyt energibehov har hurtigbåter også den egenskapen at energibehovet er sterkt avhengig av vekten på fartøyet. Om alt annet er konstant vil energibehovet omtrent doble seg hvis man doubler vekten. Dette er illustrert i Figur 3, der man kan se resultater fra et sett CFD-simuleringer av et typisk hurtigbåtskrog sammen med en tilnærminingsmodell basert på en lineær sammenheng mellom vekt og motstand. Sammen med det høye energibehovet fører denne egenskapen til en stor utfordring ved overgangen til nullutslipps kraftforsyning. Energi lagret i hydrogentanker eller batterier veier henholdsvis ca. 7.7 og 40 ganger mer enn energi lagret i form av diesel. Båtene vil dermed bli tyngre enn i dag, noe som ytterligere øker energibehovet og behovet for batterier eller hydrogentanker, og som igjen øker vekten. Dette gir en ond sirkel som – om man ikke

gjør radikale trekk knyttet til energibehovet for fartøyet – begrenser rekkevidden man kan oppnå med nullutslippsbåter til et relativt lavt nivå.



Figur 4: Vekt per kWh levert til drivaksel for diesel-, hydrogen- og batteridrift.

I tillegg til å veie mer enn diesel per enhet energi, har også nullutslipps energibærere en annen økonomisk kostnad per enhet energi. Figur 5 viser en oversikt over pris per kWh energi levert til drivaksel på fartøyet, for diesel, elektrisk strøm og hydrogen. Et interessant moment ved disse tallene er at det er stor prisforskjell på de ulike miljøvennlige energibærerne. Hydrogen bringer med seg en kostnadsøkning på 45% relativt til diesel, mens strøm til batterier er 46% rimeligere enn diesel.



Figur 5: Kostnad per kWh levert til drivaksel for diesel-, hydrogen- og batteridrift.

Grunntanken i prosjektet vi har gjennomført er at det er naturlig å starte elektrifiseringsprosessen av hurtigbåter med å ta et steg tilbake og re-evaluere fartøyteknologien man bruker for hurtiggående transport på vann. Om man kan endre denne til en mer energieffektiv teknologi vil man få en positiv designspiral der redusert energibehov gir redusert behov for vekt drivende energilager og dermed ytterligere redusert energibehov. Små endringer i fartøyteknologiens effektivitet kan gi store endringer i rekkevidde og energibehov. Lavere energibehov vil gi lavere drivstoffutgifter, noe som vil være spesielt avgjørende om fartøyet skal drives av hydrogen. Økning i rekkevidde vil åpne for å bruke batteridrevne fartøyer på ruter der man ellers ville behøve hydrogendrift. Med referanse til tallene i Figur 5 kan man se at dette vil kutte energikostnadene for nullutslippsdrift av hurtigbåter

med mer enn 60%, noe som vil ha en positiv påvirkning på den kommersielle levedyktigheten av nullutslipps fartøysdrift.

Arbeidet som har blitt gjort

Arbeidet med utviklingskontrakten spenner om mange temaer og fagdisipliner. Mange elementer i fremtidens hurtigbåt er lik med eksisterende hurtigbåter. Den skal for eksempel fortsatt ha liknende sikkerhetsutstyr, innredning, og bagasjehåndtering. Denne rapporten handler primært om det som er nytt. Under følger en kort beskrivelse av hvert tema, i den rekkefølgen disse behandles i rapporten.

Bakgrunnskunnskap

Dette prosjektet har i stor grad handlet om å prosjektere en ny generasjon hydrofoilbåter. Vi begynner dermed fortellingen om fremtidens hurtigbåt med å gi en kort oppsummering av historien til hydrofoilbåten.

Prosjektering av fartøyer

Tre forskjellige hurtiggående nullutslippsbåter er prosjektert. Etter bakgrunnskapittelet følger en overordnet beskrivelse av vårt fartøykonsept, med spesifikasjoner, illustrasjoner og plantegninger. En 20 meter lang batteribåt foreslås for den korte ruten mellom Trondheim og Vanvikan. En 30 meter lang båt foreslås for de to lengre rutene mellom Trondheim og Brekstad og mellom Trondheim og Kristiansund. I tillegg har vi grovprosjektert en 30 meter lang hydrogenbåt for ruta mellom Trondheim og Kristiansund. Hydrogenbåten er primært prosjektert for å ha et sammenlikningsgrunnlag for batterialternativet.

Optimalisering av vingedesign

For hvert av fartøyene har vi optimalisert vingegeometrien på hydrofoilsystemet for minimalt energibehov for den gitte vekten og hastigheten. Dette sikrer at energibehovet er minimalt. Tunge hydrodynamiske simuleringer med Computational Fluid Dynamics (CFD)-programvare er gjort på flere designiterasjoner - inkludert det endelige designet – for å være sikre på at hydrofoilsystemet har så lav motstand som man predikerer fra designverktøyene. Strukturberegninger er gjort for hydrofoilene. Kavitasjonsutfordringer er også studert og løsninger er foreslått.

Design av kontrollsystem og simulering av sjøegenskaper

Hydrofoilbåter har potensiale til å kraftig redusere ubehagelige bevegelser, ved hjelp av aktivt styrte kontrollflater og kontrollsystem. Et automatisk flykontrollsystem er utviklet for hvert av fartøyene, og optimalisert for vær- og bølgeforholdene som forventes på rutene i Trøndelag. Fartøyenes oppførsel i bølger er simulert og kombinert med værstatistikk for de siste 12 måneder. Tilsvarende simulering er gjennomført for konvensjonelle katamaraner, for å gi et sammenlikningsgrunnlag for komfortnivå og sjøegenskaper. Statistikk for bevegelser og sjøsyke presenteres.

Design av propulsjonssystem

En hydrofoilbåt kan ikke bruke helt de samme fremdriftsløsningene som en normal båt. Ettersom skroget flyr over vannet i designhastighet må vi tilpasse fremdriftsløsningen. Hvordan vi har gjort dette blir beskrevet i propulsjonskapitlet. Optimal vanninntaksgeometri er utviklet for vannjettfremdriften på hvert av fartøyene. Fremdriftsløsningen er robust og sikrer god propulsjonsvirkningsgrad og manøvreringsegenskaper tilsvarende de man finner i dagens fartøyer.

Design og dimensjonering av kraftforsyning

Et omfattende studium av state-of-the-art av batteri- og hydrogenteknologi har vært gjennomført. Siden hurtigbåter er sensitive for vekt har det vært sterkt fokus på nøyaktig estimering av vekt per energimengde og vekt per motoreffekt for alt utstyr som inngår i kraftsystemet. Tall fra ulike leverandører er sammenlignet, og vi har også sammenlignet batteri- og hydrogenteknologi mot

hverandre. Dette sikrer at man starter med de letteste løsningene, som igjen vil gi det mest energieffektive fartøyet. Kraftsystem er så dimensjonert gjennom en iterativ rutesimuleringsprosess, og energiforbruk per distanse har blitt regnet ut for både batteri- og hydrogendrevet båter, med og uten hydrofoiler.

Økonomiske beregninger

Som et ledd i innhenting av data om kraftsystem har vi funnet og estimert kostnader for de presenterte løsningene. Kostnadsestimater inkluderer både innkjøpskostnad (CAPEX) og driftskostnad (OPEX) for kraftsystemet.

Sikkerhets- og godkjenningsstudier

For å avdekke sikkerhetsutfordringer har et Hazard Identification-studium blitt gjennomført i samarbeid med Sjøfartsdirektoratet. Målet har vært å identifisere potensielle faremomenter ved de foreslåtte løsningene og å finne løsninger og tiltak mot disse.

Bygging av prototype

Utviklingskontrakten har delfinansiert arbeidet med bygging av et nedskalert fartøy med samme teknologi som presentert i denne rapporten. Fartøyet er bygget i karbonfiberkompositt, har hydrofoiler og batteridrift, og skal etter planen fly ved årsskiftet 2019/2020.

Ikke dekket av denne rapporten

Basert på oppdragsbeskrivelsen til Trøndelag fylkeskommune har vi kun fokusert på «båt-delen» av en miljøvennlig hurtigbåt. Det vil si at problemstillinger knyttet til ladeinfrastruktur og hydrogeninfrastruktur – fylling, transport og produksjon – ikke er vurdert i denne rapporten. Oppdraget fra fylkeskommunen var å anta at både hydrogen og strøm er tilgjengelig, i så store mengder som det er behov for, og prosjektere den beste nullutslippshurtigbåten med den antagelsen. Dette er ikke en urimelig antagelse. Ladeinfrastruktur med stor ladeeffekt, dimensjonert for store maritime batterier blir allerede i dag brukt av flere elektriske ferger i Norge [1]. Hydrogenfyllestasjoner produseres og utvikles blant annet av det norske selskapet NEL [2], som også har en aktiv satsning mot det maritime markedet. Vi likevel vil gjerne minne om at problemstillinger knyttet til infrastruktur i noen sammenhenger kan være avgjørende for valg av energibærer. Det at dette ikke er dekket i denne rapporten er ikke et uttrykk for at det ikke er viktig, men snarere at dette ikke var en del av vår oppdragsbeskrivelse.

Veien videre

Arbeidet med å utvikle en nullutslippshurtigbåt vil fortsette umiddelbart etter levering av denne rapporten. Flying Foil har som mål at den skalerte prototypen skal være funksjonell innen utgangen av 2019 slik at planlagt testing kan igangsettes. Flying Foil As skal sammen med Brødrene Aa og Westcon Power & Automation gjennomføre et Pilot-E-prosjekt fra høsten 2019 hvor målet er å detaljprosjekttere en elektrisk hydrofoilhurtigbåt som kan være med i fremtidige anbudskonkurranser.

TIDLIGERE HYDROFOILBÅTER



Å bruke vinger til å løfte hurtiggående båter er ikke nytt. Den første hydrofoilbåten fløy allerede i 1906 – 3 år etter det første motoriserte flyet - og den første passasjerbåten med hydrofoiler – Supramar PT10 Freccia d'Oro - ble bygget i 1952. Det var mye forskning på hydrofoilbåter til militært bruk under den kalde krigen, og marinen i både USA, Sovjet-unionen, England, Canada, Tyskland, Italia og Japan hadde flere hydrofoilbåter i drift på 50- til 70-tallet. Hydrofoilbåter til militært bruk var attraktivt på grunn av den høye hastigheten relativt til konvensjonelle båter. I Norge ble den første hydrofoilbåten – «HF Vingtor» - tatt i bruk i 1960. Frem til sent på 1960 taller var omtrent alle hurtiggående passasjerferger hydrofoilbåter [3].

De første hydrofoilbåtene var laget for å kunne fly uten aktivt styringssystem. Ved hjelp av skråstilte foiler eller flere hydrofoiler i «trappe-konfigurasjon» kunne man lage hydrofoilbåter som var passivt stabile, og som derfor var mulig å operere selv før datamaskiner og passende sensorer eksisterte. Selv om passivt stabile hydrofoilbåter var mer energieffektive enn konvensjonelle båter på 50- og 60-tallet hadde de en stor negativ egenskap: dårlige sjøegenskaper som gjorde dem ukomfortable i dårlig vær. Dette gjorde at aktivt styrte hydrofoilbåter ble utviklet så fort datamaskiner og sensorer hadde utviklet seg nok til at dette var praktisk gjennomførbart. De første aktivt styrte hydrofoilbåtene fløy allerede på starten av 70-tallet, og kunne tilby signifikant bedre sjøegenskaper enn både gamle hydrofoilbåter og konvensjonelle skip.

Hydrofoilbåter som passasjerferger er fortsatt mye brukt flere steder i verden, spesielt i Russland, Kina og Japan. I Russland brukes fortsatt passivt stabile hydrofoilbåter for å kunne bevege seg hurtig i elver og kanaler hvor sjøegenskaper ikke er like viktig som på det åpne havet. I Asia er aktivt styrte hydrofoil båter – primært Boeing sin hydrofoilbåt fra 1976, «Boeing 929 Jetfoil» - attraktive på grunn av overlegne sjøegenskaper som gir høy komfort.

I Norge ble det sent på 80-tallet utviklet to hydrofoilbåter som var ment å erstatte den allerede da aldrende Boeing Jetfoil. Både Kværner-Fjellstrand og Båtservice Mandal utviklet hver sin hydrofoilbåt kalt «FoilCat» (to selskaper endte på samme navn). Disse båtene var laget for høy fart – opp mot 50 knop – og med fokus på sjøegenskaper og komfort i større grad en energieffektivitet.

I dag kan man fortsatt kjøpe hydrofoilbåter både av typen Boeing 929 Jetfoil – produsert på lisens av «Kawasaki» [4] – og passivt stabile hydrofoilbåter laget i Italia av verftet «Liberty Yards» [5].

Hydrofoilbåter gjennom historien

Prototyper



Forlaninis prototype

1900

1910



Bells HD-4

1920

1930

Passasjerferger



Supramar Freccia d'Oro

1940

1950



Boeing JetFoil

1960



Boeing JetFoil, USA

1970

1980

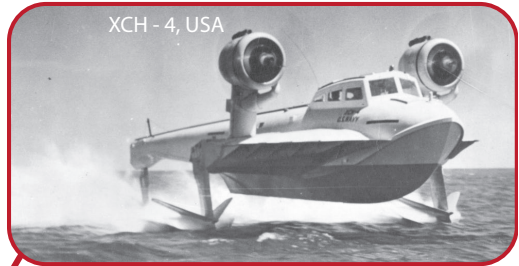


Fjellstrand FoilCat, Norge

1990

2000

Militærfartøy



XCH-4, USA



Pegasus class, USA



Turya class, USSR

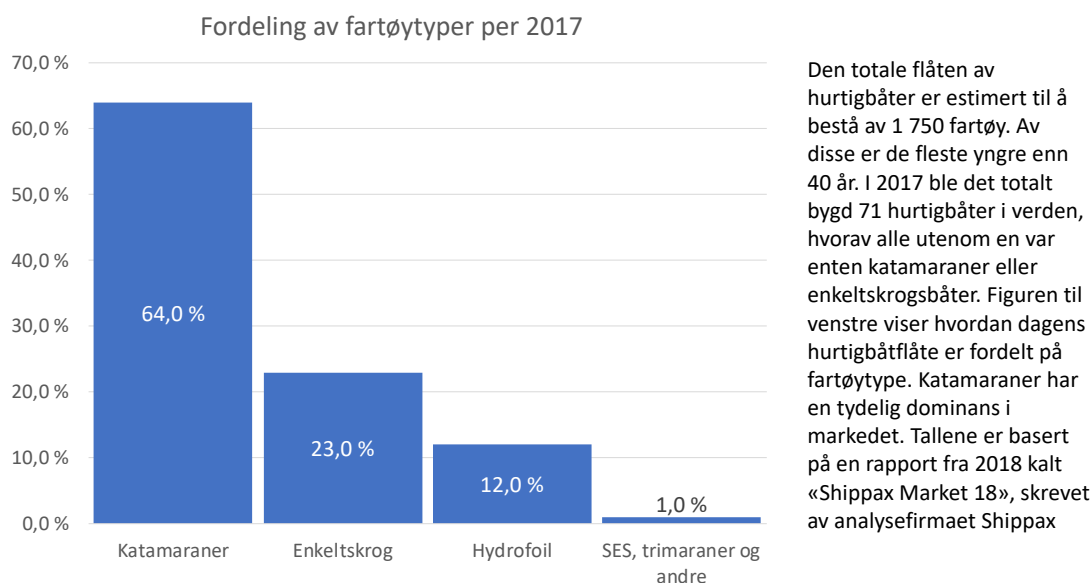
Regattaseiling



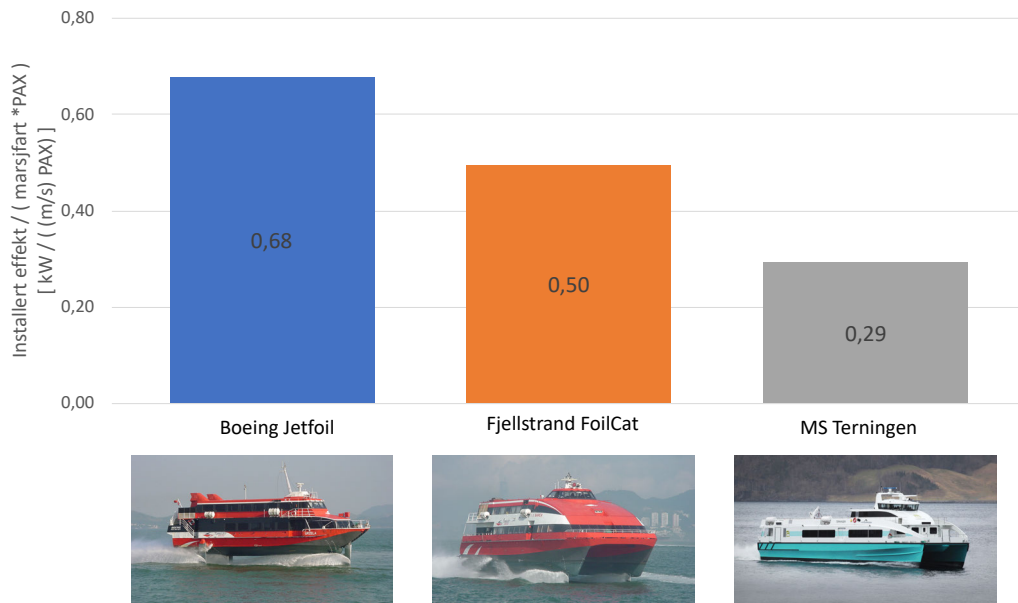
Americas Cup

USA, Italia, Frankrike, Sverige, Sør-korea, Kina, New-Zeland

Årsaken til at hydrofoilbåten ble introdusert for både passasjertransport og militærbruk var i utgangspunktet evnen til å bevege seg fort med – relativt sett – lavt energiforbruk. De hadde sin storhetstid på 60-tallet, men har i nyere tid stort sett tapt terreng til andre fartøystyper, og da primært til katamaraner. Figuren under viser hvordan forskjellige fartøy er fordelt etter type per 2018



Katamaraner begynte gradvis å ta over hurtigbåtmarkedet på 80-tallet [3]. Det er flere grunner til at hydrofoilbåter har blitt byttet ut med mer konvensjonelle fartøy. For det første er både katamaraner og enkeltskrogsbåter enklere konstruksjoner enn hydrofoilfartøy, som også gjør dem billigere i innkjøp. De gamle hydrofoilbåtene med aktiv styring var dyre i både innkjøp og drift. De passive hydrofoilbåtene hadde dårligere sjøegenskaper og gjorde at disse kun var attraktive i beskyttet farvann som russiske elver og nederlandske kanaler. Vi tror likevel at den største grunnen til at hydrofoiler har mistet markedsandeler i nyere tid er energiforbruket. En hydrofoilbåt fra 1957 var relativt like energieffektiv som en konvensjonell båt fra samme tid, men når katamaraner ble introdusert på 80-tallet endret bildet seg dramatisk. Energieffektive slanke skrog gjorde at forskjellen på en konvensjonell båt og hydrofoilbåt falt dramatisk. En reduksjon i hastigheten på mange ruter har også styrket konkurranseevnen til konvensjonelle fartøyer. Mens både Jetfoil og FoilCat er designet for å operere opp mot 50 knop opererer de fleste hurtigbåter i Norge i dag mellom 25 – 33 knop. Sist men ikke minst ble lettvektmaterialer som karbonfiber først tatt i bruk av hurtigbåtverft som bygget katamaraner – med Brødrene Aa i spissen for denne utviklingen – mens dagens hydrofoilbåter fortsatt bygges av aluminium og stål. Resultatene av dette kan man se i figuren under hvor vi har plottet energieffektivitet for både Jetfoil og FoilCat, målt ved installert motoreffekt / (marsjfart * antall passasjerer), og sammenliknet dette med en av katamaranene som i dag opererer rutene i Trøndelag, MS Terningen. Figuren viser at en moderne karbonfiberkatamaran fra Brødrene Aa er mer energieffektiv enn en hydrofoilbåt med design fra 80- og 90-tallet.



Sammenlikningen mellom hydrofoilbåter og konvensjonelle skip som vist i figuren over mener vi er urettferdig mot hydrofoilbåten som konsept. **For å få til en rettferdig sammenlikning må designet av hydrofoilsystemet utvikles med moderne metoder, byggematerialet må oppdateres til karbonfiberkompositt for lav vekt og lave konstruksjonskostnader, og hastigheten må tilpasses ruta den skal operere på.** Det har vi gjort i dette prosjektet, og vi vil vise at det er gode miljøgrunner til å gi hydrofoilbåten en ny storhetstid. Mens en karbonfiberbåt fra Brødrene Aa er opp mot 40% mer energieffektiv enn Fjellstrand sin FoilCat, skal vi vise at en ny generasjon hydrofoilbåter fra Flying Foil og Brødrene Aa ender opp med å være 30% mer energieffektiv enn dagens båter. Dette tilsvarer 58% mer energieffektiv enn tidligere hydrofoilbåter.

OVERORDNET BESKRIVELSE AV VÅRT FARTØYKONSEPT

I dette prosjektet har vi designet to båter: **Flyer 20**, en 20 m lang hydrofoilbåt med plass til 129 passasjerer og **Flyer 30**, en 30 m lang hydrofoilbåt med plass til 270 passasjerer. I dette kapittelet vil vi gi en overordnet beskrivelse av fartøydesignet vi kom frem til i prosjektet. Endelig design er et resultat av mange iterasjoner, både på detaljer og på overordnet konsept. En redegjørelse på hvordan vi har endt opp med det spesifikke designet vil være overordnet tema for store deler av denne rapporten. Dette kapittelet er en presentasjon av det endelige resultatet.



Figur 6: Illustrasjon av Flyer 30

Oppsummering av designkrav

Designet av både hydrofoilsystem og kraftforsyning har i dette prosjektet blitt gjort med automatiserte metoder, delvis utviklet som en del av dette prosjektet. Ettersom samme designprinsipp ligger bak begge båtene er det mye ved disse to båtene som er ganske likt. Vi har brukt nøyaktig de samme metodene for å fininnstille vingegeometrien, dimensjonere kraftsystemet og designe mekanikken i de representative båtene. I tillegg er begge båtene basert på Brødrene Aa sin veletablerte plattform for hurtigbåter bygget i karbonfiber.

Forskjellen på de to fartøyene består primært av to ting. **Flyer 30** er designet for lange ruter med mange passasjerer, mens **Flyer 20** er designet for korte ruter, med få passasjerer, og hyppige avganger. Forskjellen i antall passasjerer gir utslag i størrelsen på hoveddekket til båtene, og dermed også størrelse på den resterende båten. Lengden på ruta gir litt utslag i kravet til hastighet og sammen med antall avganger, forskjell i hvordan batteripakken er dimensjonert. Designkravet til de to fartøyene er oppsummert i tabellen under.

Designkrav	Flyer 20	Flyer 30
Antall passasjerer	129	270
Designhastighet	35 knop, 65 km / t	40 knop, 74 km / t
Rute	Trondheim - Vanvikan	Trondheim – Brekstad og Trondheim - Kristiansund
Dimensjonerende rekkevidde	35 km	90 km
Energilagring	Batteri	Batteri
Tid for lading på enden av hver overfart	15 minutter	30 minutter

Hvordan greier vi batteridrift på alle rutene i Trøndelag?

Begge båtene er designet for å kunne opprettholde dagens rutetilbud. Primært har dette hatt innvirkning på designhastigheten til båtene og ladetiden til batteriene. Begge båtene går betydelig raskere enn dagens båter i Trøndelag. **Denne fartsøkningen er innført for å frigjøre tid til lading av batterier mellom hver avgang.** På grunn av hydrofoilsystemet kan vi øke hastigheten uten betydelig økning av energiforbruk til fartøyet. Flyer 20 har designhastighet som er 40% høyere enn Trondheimsfjord II som operer på ruta Trondheim – Vanvikan i dag, mens Flyer 30 har en designhastighet som er over 21% høyere enn MS Terningen/Tyrhaug som opererer på ruta Trondheim – Brekstad og Trondheim – Kristiansund. Dette fører til at en halv time blir spart på selve overfarten mellom Trondheim – Kristiansund, og ca. 10 minutt blir spart inn på overfarten Trondheim – Vanvikan – Trondheim. Den innsparte tiden kan brukes til å lade fartøyet ved strategiske havner, og likevel opprettholde samme totaltid på rutene som i dag. Passasjerene vil komme frem til ønsket destinasjon raskere eller på samme tid som i dag. Distansen Trondheim – Brekstad kan f.eks. gjennomføres på 43 minutter med Flyer 30, mot rundt 52 minutter i dag.

Flyer 20 kan gjennomføre overfarten Trondheim – Vanvikan – Trondheim på en halv time. Med en antatt manøvreringstid til og fra kai på 10 minutter er det igjen 20 minutter til lading mellom hver tur i rushtrafikken. Batteriet er dimensjonert for å kunne lades på 15 minutt som vil kreve 2,7 MW ladekapasitet.

Flyer 30 opererer på to av rutene i dette prosjektet. Overfarten Trondheim – Brekstad – Trondheim kan gjennomføres med kun 10 minutter ladetid på Brekstad, og en halv time ladetid i Trondheim. Overfarten Trondheim – Brekstad – Sandstad – Kristiansund kan gjennomføres med 15 minutter ladetid på både Brekstad og Sandstad, og med 30 minutter ladetid på hver ende av ruta. Nødvendig ladeeffekt for Flyer 30 er på 5,7 MW.

Skipsplattform fra Brødrene Aa

Begge båtene baserer seg på Brødrene Aa sin serie av passasjerkatamaraner bygget i karbonfiber. Brødrene Aa har bygget karbonfiberbåter siden starten av 2000-tallet, og levert båter som opererer i hele Norge, og flere plasser i resten av verden som f.eks. Kina. Båtene har vist seg å være både robuste og energieffektive. Når Nordland fylkeskommune skulle velge nye båter for den spesielt værutsatte ruta «Nordlandsekspressen» falt valget på Brødrene Aa. Når MS terningen og Tyrhaug ble innført på rutene i Trøndelag ved forrige anbudsrunde ble energiforbruket til hurtigbåtene redusert med 30% på grunn av den lave vekten av karbonfiberkonstruksjonen.

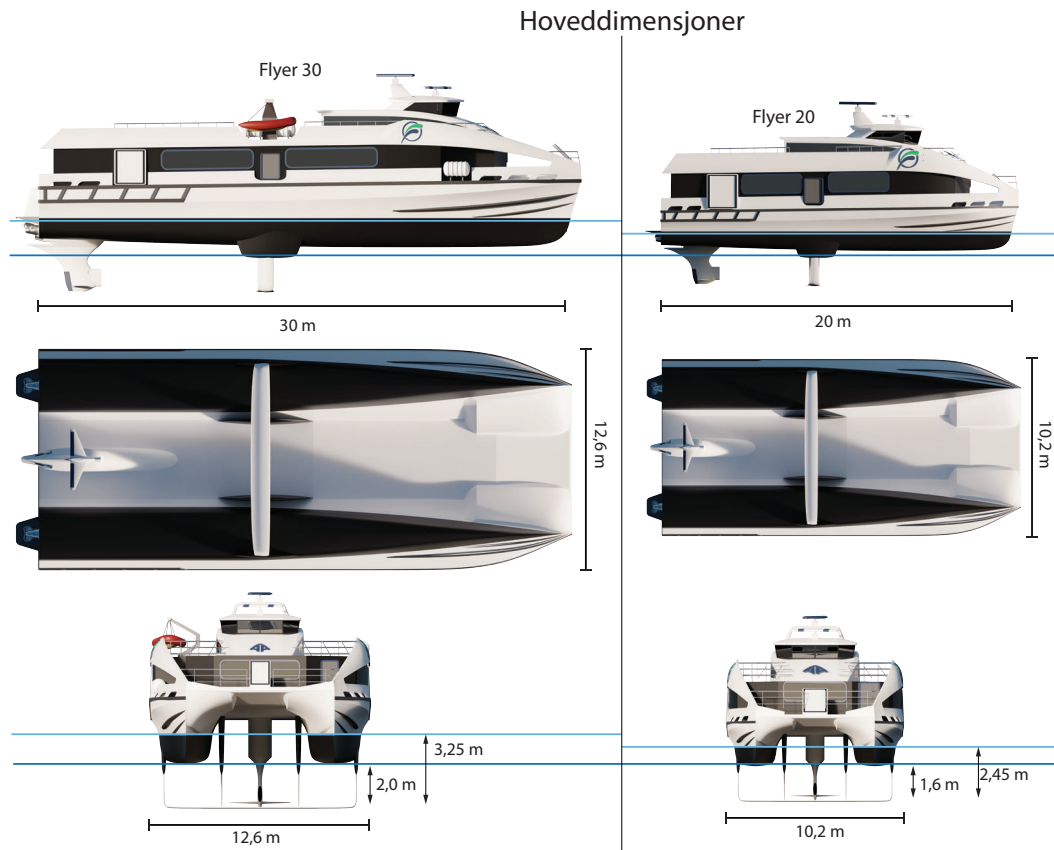
Skroget til Flyer 20 og Flyer 30 er basert på samme skrogmodell som de vanlige båtene til Brødrene Aa. Ettersom hydrofoilene ikke løfter fartøyet ut av vannet før båten har kommet opp i relativt høy hastighet er energieffektive skrog viktig for å redusere take-off motstand. Denne energieffektiviteten oppnår vi med den etablerte skrogserien til Brødrene Aa.



Figur 7: Innredning og brodesign fra Brødrene Aa

Hoveddimensjoner

Hoveddimensjonene til Flyer 30 og Flyer 20 er vist i figuren under



Figur 8: Hoveddimensjoner Flyer 20 og Flyer 30

Vekt av en hurtigbåt

Gjennom dette prosjektet har det blitt undersøkt flere tiltak for å redusere vekt. Vi har blant annet sett på muligheten for bytte ut glassvinduer med plexiglass og endre struktur på overbygget. Dessverre har de fleste av disse tiltakene vist seg å ha liten effekt på totalvekten. En hurtigbåt fra Brødrene Aa er allerede vektoptimalisert. På grunn av at karbonfiber er valgt som konstruksjonsmateriale er selve konstruksjonsvekten allerede under 30% av lettskipsvekten. En del av vekten ombord i en hurtigbåt er knyttet til sikkerhetsutstyr annet nødvendig inventar. For eksempel veier alt utstyr som trengs for passasjerer og mannskap omtrent like mye som hele karbonfiberstrukturen. Dette inkluderer seter, kloakkanlegg, sikkerhetsutstyr og mye annet. I teorien kunne man gjort vektreduserende tiltak ved å redusere antall toaletter ombord, eller redusert på komfortnivået ombord i båten. Dette har ikke blitt gjort i dette prosjektet da det i stor grad er ulovlig (antall toaletter er regulert av klasseregler) og mest sannsynlig uønsket. Vårt mål i dette prosjektet var å muliggjøre nullutslipp, samtidig som vi opprettholder dagens standard.

Et av de vektreduserende tiltakene vi fant i dette prosjektet var en endring av båtens hoveddimensjoner. For å få til så energieffektive hydrofoiler som mulig er det ønskelig med stor bredde på hydrofoilene. Vi bestemte oss derfor for å prosjektere en båt hvor vi øker bredden for å få økt energieffektivitet på hydrofoilene, men redusert lengde på båten for å spare vekt. Dagens båter på rutene i Trøndelag er 25 m og 40 m lange og Flyer 20 og Flyer 30 er henholdsvis 20 og 30 m. Vi kan få plass til samme mengde passasjerer ved å utnytte den økte bredden til en litt annen setekonfigurasjon.

Alle vekttestimat for Flyer 20 og Flyer 30 baserer seg på Brødrene Aa sine vektberegningsprogrammer med erfaringsdata fra 60 karbonfiberbåter over nesten 20 år. Totalvekten av båten inkluderer hele strukturen, seter, alt som kreves av sikkerhetsutstyr, vann og avløpssystemer, teknisk utstyr som ventilasjon, sensorer, elektriske kabler, kioskutstyr og alt annet – smått og stort – som finnes i en hurtigbåt.

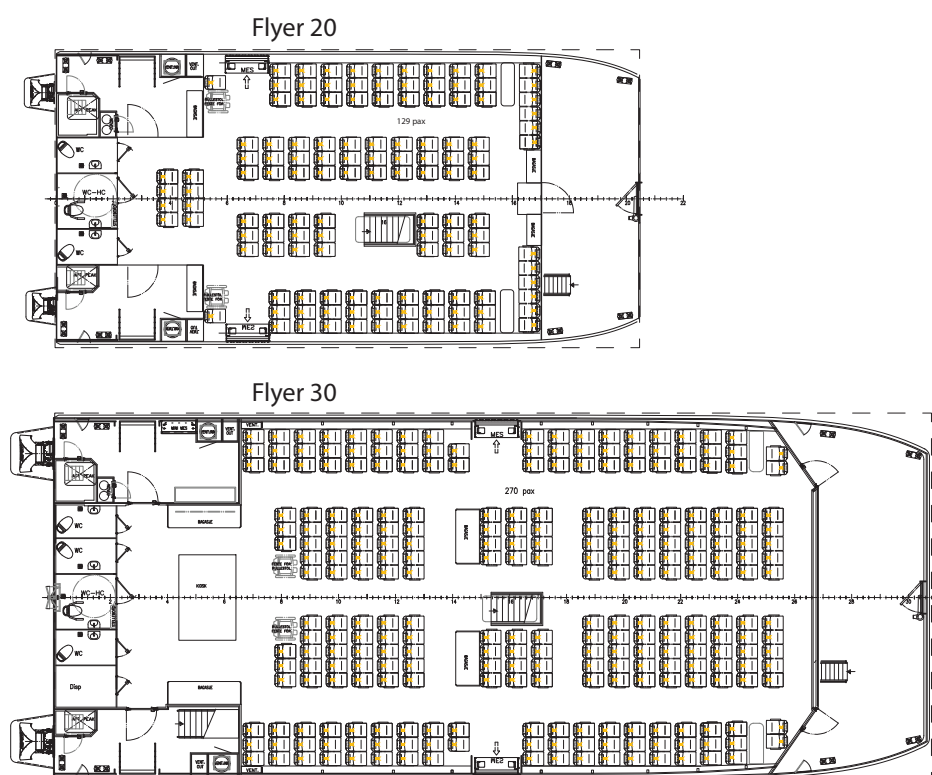
En signifikant del av vekten av en miljøvennlig hurtigbåt – om den er drevet av batterier eller hydrogen – er kraftforsyningen. Det aller beste tiltaket vi fant for å redusere vekt var dermed å minimere vekten av batteripakkene. Dette har vi gjort ved å optimalisere kravet til batteriet ombord i båtene og ved å designe så energieffektive hydrofoiler som mulig. En oversikt over vekten til Flyer 20 og Flyer 30 er vist i tabellen under.

Vektkategori	Flyer 20	Flyer 30
Lettskipsvekt av skipet, uten kraftforsyning, og hydrofoilsystem	■	■
Ekstra vekt på grunn av hydrofoilsystem	1 tonn	2 tonn
Vekt av kraftsystem	19 tonn	48 tonn
Vekt av passasjerer	10 tonn	20 tonn
Dødvekt utover passasjerer (ferskvann og kloakk)	0,5 tonn	1 tonn
Totalvekt av fullastet båt	■	■

Dekksplan

Setekonfigurasjon for Flyer 20 og Flyer 30 er utarbeidet for å få plass til tilsvarende mengde passasjerer som dagens båter, men med mindre lengde og større bredde. Dette ble gjort av Brødrene Aa, og normale sikkerhetskrav for en hurtigbåt ble fulgt. Dekksplanen for hoveddekket til Flyer 20 og Flyer 30 er vist i figuren under. Arrangement under dekk, med plassering av batteri, motorer og kraftelektronikk vises i kapittelet om kraftforsyning.

Hoveddekk Flyer 20 og Flyer 30



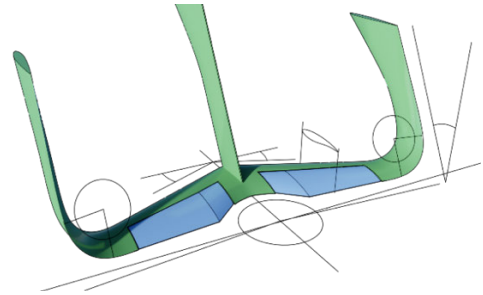
Figur 9: General Arrangement, Flyer 20 og Flyer 30 hoveddekk

Energiforbruk

Beregninger av effekt og energiforbruk for Flyer 20 og Flyer 30 baserer seg på hydrodynamiske simuleringer for å estimere motstanden på båten, samt virkningsgraden til propulsjonssystemet. Forklaring av hvordan dette er gjennomført vil bli forklart i løpet av resten av denne rapporten. Resultatene av disse beregningene er vist i tabellen under.

Parameter	Flyer 20	Flyer 30
Størrelse på batteripakke	900 kWh	4 300 kWh
Rekkevidde ved bruk av hele batteriet	53 km	140 km
Rekkevidde ved bruk av 64% av batteriet	35 km	90 km
Maks ladeeffekt	2 700 kW	5 600 kW
Beregnet løft / motstand	■	■
Propulsjonsvirkningsgrad	69%	69%
Totalvirkningsgrad (med elektriske tap)	66%	66%
Propulsjonseffekt I designhastighet	1 036 kW	2 261 kW
Installert motoreffekt	1 200 kW	2 500 kW
Energiforbruk per distanse	16 kWh / km	31 kWh / km
Energiforbruk per passasjerdistanse	0,124 kWh / (PAX km)	0,115 kWh / (PAX km)

VINGEDESIGN

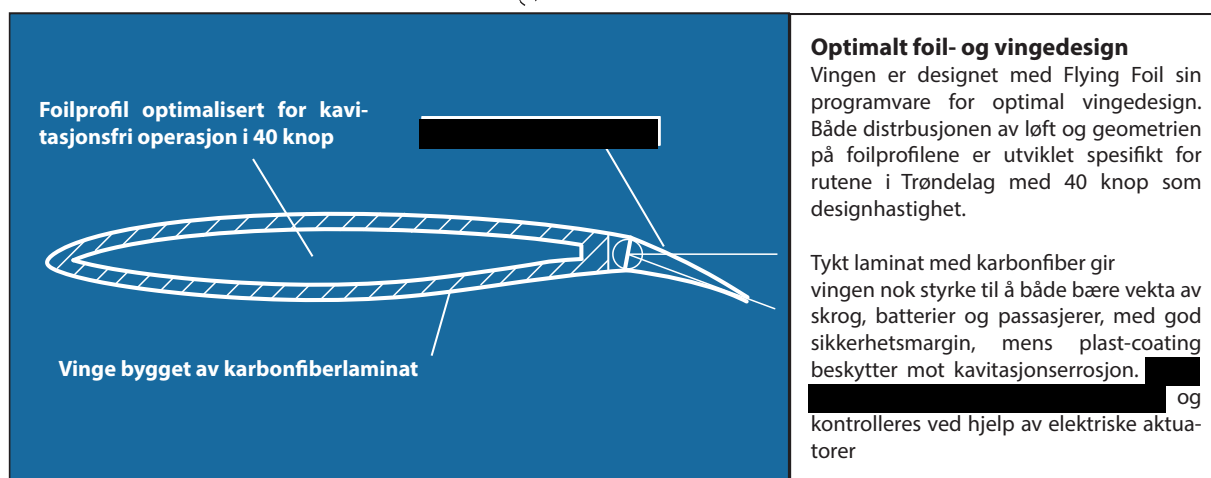
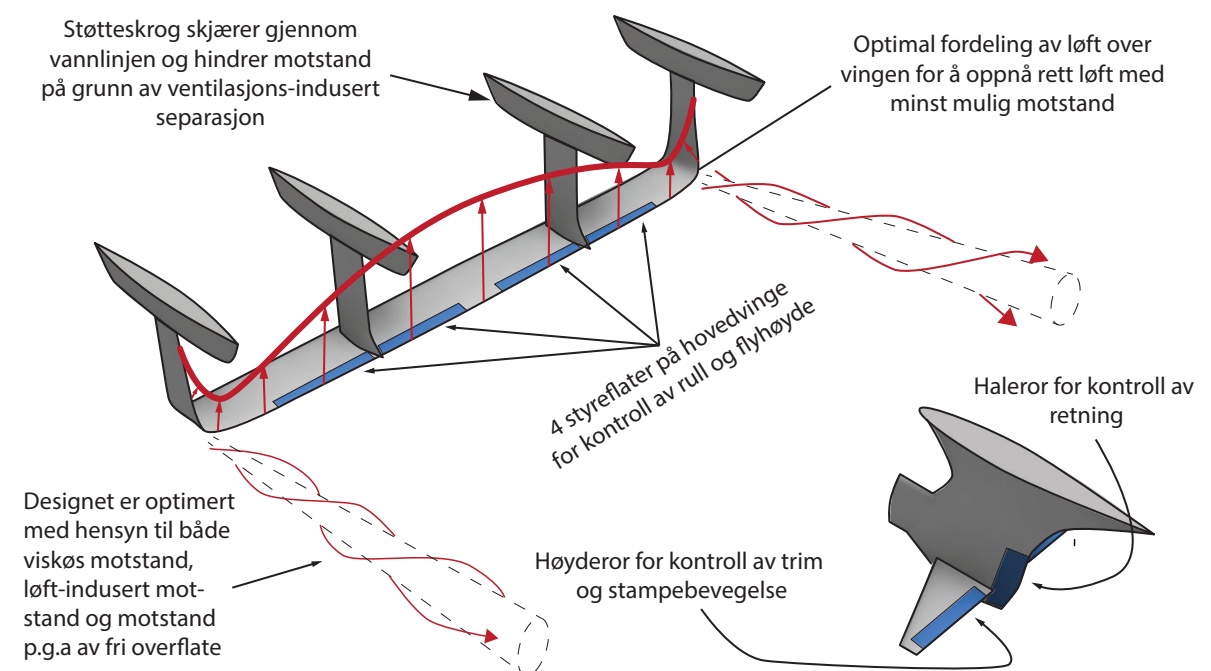
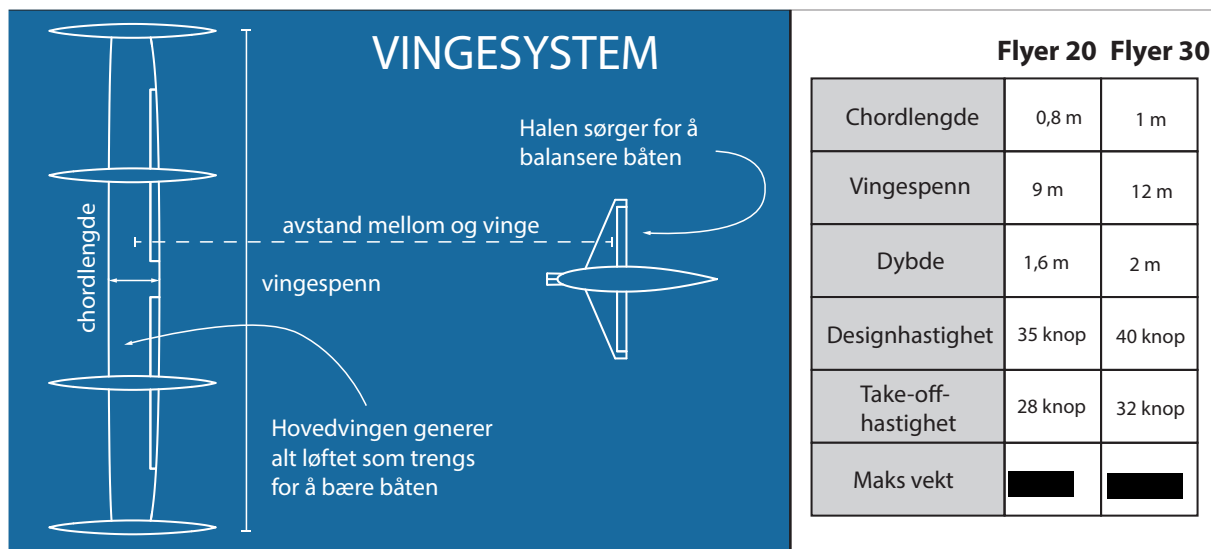


Utformingen av selve hydrofoilsystemet er en av de viktigste oppgavene for å få til en energieffektiv hydrofoilsystem og har derfor også vært en av de største oppgavene i denne studien. Målet har vært å få til et vingedesign som kan bære hele vekten av båten i designhastighet, med så lite motstand som overhodet mulig. I dette kapitlet vil vi beskrive designet av vårt hydrofoilsystem, forklare hva som ligger bak designet, og knytte vårt design opp mot både tidligere hydrofoilsystemer og design av vinger i flyindustrien.

For å oppnå så energieffektivt design som overhodet mulig har vi optimert foilprofiler, spenngeometri og løftfordeling. Vi har undersøkt flere utfordringer knyttet til det å bygge hydrofoilsystemet av karbonfiber og kommet frem til løsninger.

Hydrofoilsystemet er utformet ved hjelp av Flying Foil sin spesiallagde programvare for vingedesign som inneholder simuleringsmetoder, optimeringsalgoritmer og parametrisk vingegeometri. Grunnprinsippene i programvaren vil bli forklart, mens noen detaljer må holdes hemmelig av konkurransemessige forhold. For å estimere motstand og løft på hydrofoilsystemet har vi brukt «Computational Fluid Dynamics» (CFD) simuleringer, basert på OpenFOAM og en spesialutviklet programvare for automatisert simuleringsoppsett for hydrofoiler.

Neste side viser en oversikt over hydrofoilsystemene som er designet for Flyer 20 og Flyer 30, med tegninger og visualiseringer hentet fra CAD modellen som beskriver geometrien. Hovedforskjellen på Flyer 20 og Flyer 30 er arealet av vingen, som er tilpasset til å kunne løfte den respektive vekta av fartøyet. Relative designvariabler, som aspektforhold og dybde/chordlengde er likt for begge fartøy. Dette gjør også at den motstanden relativt til løftet de to vingene produserer er nesten identisk.



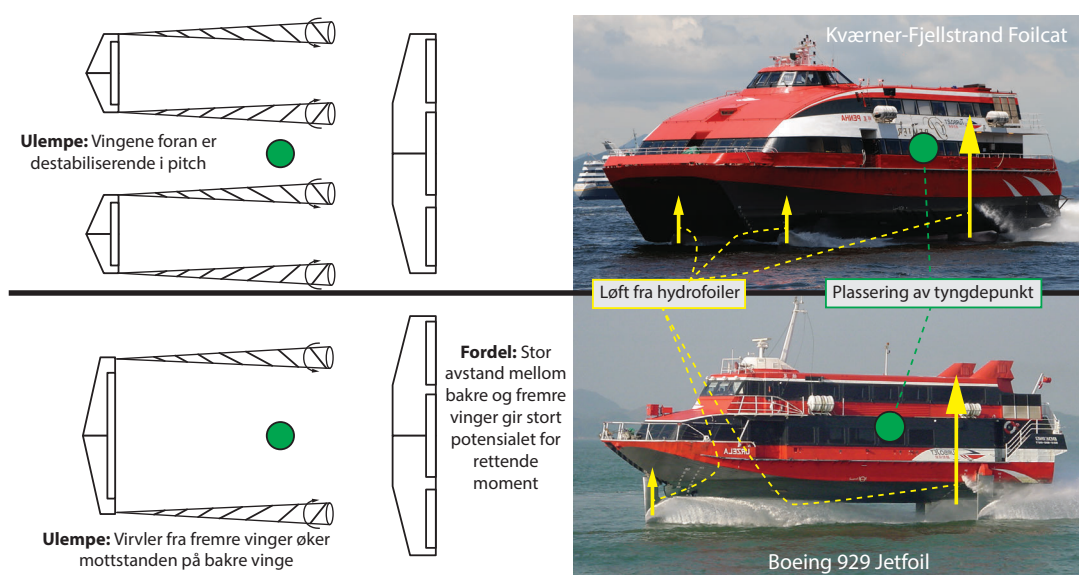
Generell beskrivelse av vingeoppsett

Hydrofoilbåtdesignet i dette prosjektet har flere likheter med forrige generasjons hydrofoilbåter fra 1980-tallet, men det finnes også helt klare forskjeller. Vi har endret overordnet vingedesign til å benytte «flykonfigurasjon», vi har optimalisert vingedesignet med moderne teknikker, og vi har byttet konstruksjonsmateriale fra rustfritt stål til karbonfiber. Resultatet er et vingedesign som er langt mer energieffektivt enn tidligere hydrofoilbåter, samtidig som både vekt og kostander holdes nede.

Den primære rettesnoren vi har brukt for å designe fremtidens hydrofoilsystem er flyindustrien. Mens vinger har vært i kontinuerlig utvikling i over 100 år i flyindustrien har hydrofoiler kun vært et nisjeprodukt i hurtigbåtindustrien. Vårt mål med fremtidens hydrofoilbåtutvikling er å «marinere flyteknologi».

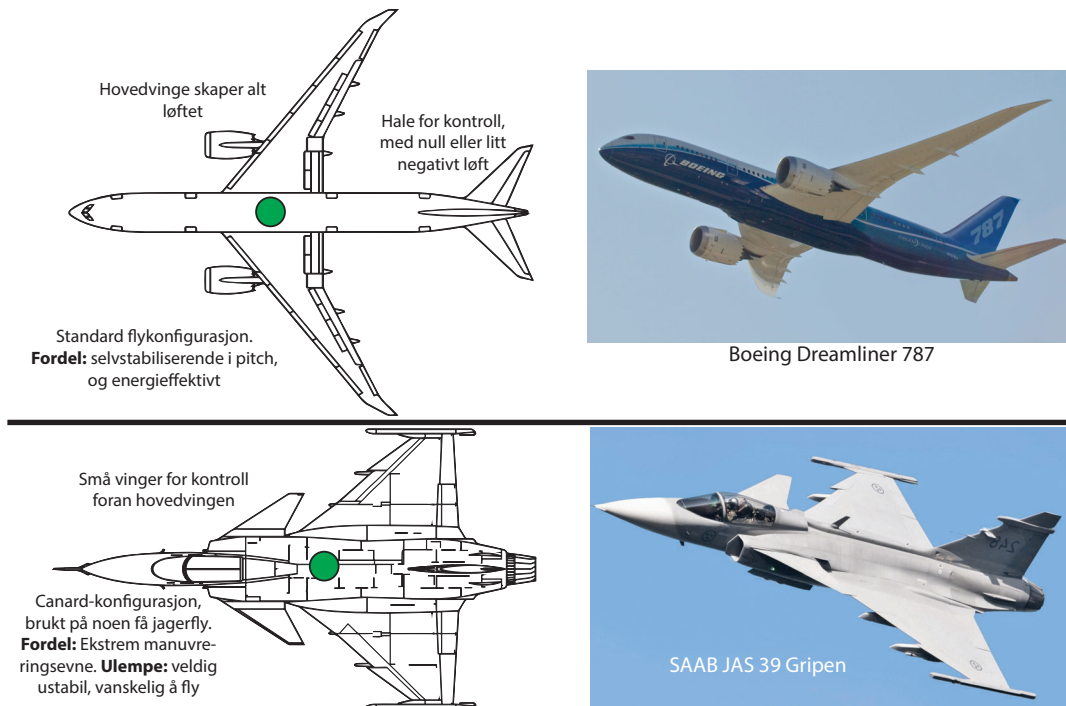
Energieffektiv og stabil flykonfigurasjon av vinger

Jobben til et hydrofoilsystem er primært å redusere båtens motstand i sjøen ved å løfte skroget helt ut av vannet. Det er flere måter å gjøre dette på. For tidligere hydrofoilbåter har den vanligste metoden vært å plassere en vinge i baugen av båten, og en i hekken. Ettersom tyngdepunktet på båter ofte er langt bak og sterkt påvirket av plasseringen av motor og fremdriftsmaskineri så vil den bakre vingen bidra med mesteparten av løftet. Denne konfigurasjonen kan ved første øyekast virke veldig naturlig. Et skrog skal balanseres, og da kan det virke opplagt å benytte et løftepunkt foran og et løftepunkt bak, som man ville gjort om man for eksempel skulle lagre båten på land. Figuren under viser denne vingekonfigurasjonen som er brukt på de fleste tidligere hydrofoilbåter, og blant annet på FoilCat og JetFoil.



Figur 10: Klassisk hydrofoil-vingekonfigurasjon eksemplifisert ved Boeing Jetfoil og Kværner-Fjellstrand Foilcat

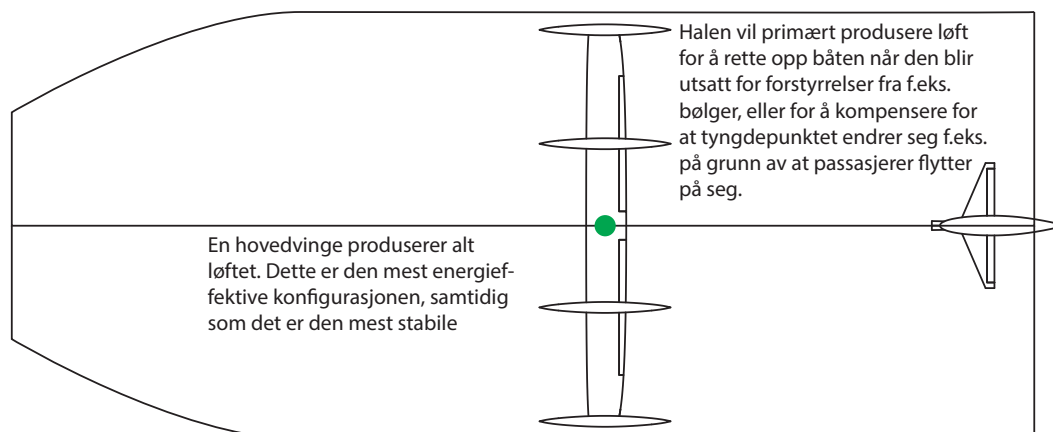
Dette er likevel en veldig ukonvensjonell vingekonfigurasjon hvis vi ser til flyindustrien, og for den del til naturen. Konfigurasjonen med løftende vinger både foran og bak kalles «Canard konfigurasjon» og er nesten utelukkende brukt på jagerfly med ekstreme krav til manøvreringsegenskaper. Nesten alle fly i verden – og da spesielt alle passasjerfly – bruker en vingekonfigurasjon hvor kun en enkelt vinge løfter hele vekta av flyet. Dette er også vingekonfigurasjonen til alle fugler i hele verden. Vingen er plassert rett under tyngdepunktet til flyet. For å holde balansen, og korrigere for endringer eventuelle endringer i tyngdepunktet benyttes en hale med lite eller ingen løft.



Figur 11: Vingekonfigurasjon for fly. Standard og canard eksemplifisert ved Boeing Dreamliner og SAAB JAS 39 Gripen

Det er primært to årsaker til at de fleste fly – og alle fugler - designet med denne vingekonfigurasjonen. Den første er stabilitet. På grunn av måten vinger skaper løft på vil alle vinger foran tyngdepunktet på et flyvende fartøy være destabiliserende. Vinger som er plassert bak tyngdepunktet virker alltid stabiliserende. Det er fult mulig å fly et fartøy – om det er fly eller hydrofoilbåt – med ustabil vingekonfigurasjon, men da kreves det mer aktivt styring fra kontrollsystemet enn hva som er tilfelle for en selvstabiliserende konfigurasjon. For et jagerfly kan det gi mening å ofre stabilitet for å kunne gjennomføre krappere svinger. For et passasjerfly, som endrer retning på en rolig og komfortabel måte, er det mer hensiktsmessig å ha et stabilt vingeoppsett.

Den andre grunnen til at vi mener «flykonfigurasjon» er bedre enn tradisjonell hydrofoilbåtkonfigurasjon er energieffektivitet. De fremre vingene vil alltid skape forstyrrelser på den bakre vingen på grunn av løft-induserte virvler. Dette gjør det vanskeligere å designe vingen for å hindre kavitasjon, og det vil alltid øke motstanden på den bakre vingen. Ved å flytte all produksjon av løft til en enkelt vinge, plassert rett under tyngdepunktet til båten, blir hydrofoilsystemet både mer energieffektivt og selvstabiliserende til samme tid. Vingekonfigurasjonen vi har valgt for Flyer 20 og Flyer 30 er vist i figuren under.



Figur 12: Vingekonfigurasjon for Flyer 30 og Flyer 20.

Spesialdesignede foilprofiler

Vinger produserer løft ved å kaste vann eller luft nedover. Dette skaper – ved hjelp av de fysiske lovene som regulerer strømning – høyt trykk på undersiden av vingen og lavt trykk på oversiden, som igjen resulterer i en kraft som løfter vingen oppover. En enkel måte å produsere løft på er å plassere en flat plate med en vinkel relativt til den innkommende gassen eller væsken. Flate plater med vinkel kan generere masse løft, men de generer også stor motstand. Designutfordringen når det kommer til vinger er dermed ikke å produsere løft – da man kan få til dette med enkle midler – men å produsere løft uten å produsere unødvendig mye motstand.

En viktig komponent for motstanden på vinger ligger i designet av tverrsnittet av vingen parallelt med den innkommende strømningen. Dette tverrsnittet kalles foilprofiler. I figuren under vises foilprofil-nomenklatur:



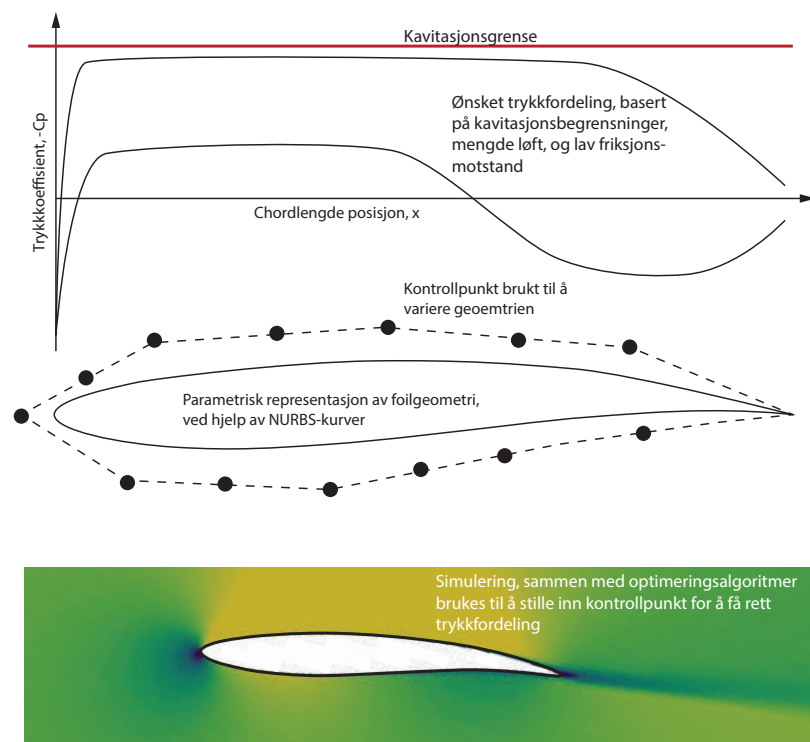
Figur 13: Foilprofil nomenklatur på engelsk. Kilde: Wikipedia [6]

Det finnes mange forskjellige foilprofiler, designet for både fly, skipspropeller, flypropeller, helikopterrotorer, ror og hydrofoilsbåter. Basert på det vi kan finne av informasjon fra tidligere hydrofoilsbåter var hydrofoildesignet i stor grad basert på en familie av foilprofiler kalt «NACA-profiler». Dette er foilprofiler som ble designet i USA på 30-tallet av forløperen til NASA. Disse foilprofilene har en enkel beskrivelse av geometrien som gjør at de er mye brukt i undervisning og fortsatt til en viss grad hos både fly- og propellprodusenter. Dette er likevel å regne som ganske primitive foilprofiler. Ved hjelp av simulering og optimering kan man lage langt bedre foilprofiler i dag enn hva man kunne på 30-tallet, og dette har også i stor grad blitt gjort både i industrien og akademien. Store flyprodusenter – som Boeing og Airbus – utvikler sine egne foilprofiler, spesialdesignet til hvert enkelt fly, mens mindre flyprodusenter bruker foilprofiler utviklet for generelt bruk av f.eks. NASA [7].

For dette prosjektet har spesiallagde foilprofiler blitt utviklet for å få mest mulig kavitasjonsfri løft for minst mulig motstand. Kavitasjon oppstår når trykket på hydrofoilen blir lavere enn damptrykket i vannet, som fører til at vannet som strømmer langs med foilprofilet går fra å være væske til å bli vanndamp. Kavitasjon fører med seg store problemer og kan føre til både tap av løft og erosjon av

vingestrukturen. For høy hastighet – slik som 40 knop – er det utfordrende å unngå kavitasjon uten å ha full kontroll på trykkfordelingen.

For å få til dette har vi valgt en vanlig designteknikk fra flyindustrien kalt «indirekte design» [8]. Istedenfor å designe geometrien direkte designer vi istedenfor trykkfordelingen vi ønsker å oppnå på foilprofilene langs med vingen. Designprosessen av geometrien består av å finne den geometrien som gir ønsket trykkfordeling. Trykkfordelingen avgjør både om kavitasjon vil oppstå eller ikke og og mye løft man oppnår med det gitte designet. Ved å benytte generell hydrodynamisk kunnskap om hva som skaper friksjonskrefter kan man også lage trykkfordelinger som har minimalt med viskøs motstand. Når trykkfordelingen er valgt setter vi opp en parametrisk representasjon av foilprofilgeometri. Ved å endre på parameterne i geometrien kan vi oppnå forskjellige former på foilprofilet. Deretter bruker vi simulering og optimeringsalgoritmer til å finne den foilgeometrien som gir ønsket trykkfordeling. Ved hjelp av denne metoden har vi full kontroll på både kavitasjon og mengde løft samtidig som vi får minimalt med motstand ved å velge hydrodynamiske fornuftige trykkfordelinger. Vi velger å ikke publisere den nøyaktige geometrien eller trykkfordelingen i denne rapporten, da dette er sensitiv informasjon som Flying Foil AS ønsker å holde hemmelig, men en figur som viser grunnprinsippet i foildesignet er vist under.



Figur 14: Illustrasjon av foildesignprosessen. Geometri og trykkfordeling er kun for illustrasjonsformal. Foilprofilet designet for dette prosjektet avviker noe fra illustrasjonen

Minimering av løft-indusert motstand

En fundamental egenskap ved løftende flater er «løft-indusert motstand». Alt som skaper løft – uansett hvor bra foilprofilet er designet – vil oppleve motstand på grunn av virvler som oppstår på tuppen av vingene. Disse virvlene oppstår fordi det er høyt trykk på undersiden av vingen og lavt trykk på oversiden. Dette gjør at vannet som strømmer over og under vingen også blir presset rundt vingetuppen. Denne prosessen skaper virvler, som igjen fører til økt motstand. Sammen med design av foilprofiler er minimering av løft-indusert motstand noe av det viktigste man kan gjøre for å skape energieffektive hydrofoilfartøy. På grunn av at hydrofoiler opererer veldig nærme overflaten mellom luft og vann vil løft-indusert motstand være større - og dermed viktigere å minimere - enn for fly. I designhastighet er løft-indusert motstand rundt 60% av totalmotstanden på vingen.



Figur 15: Bilde som viser resultatet av løft-indusert motstand. Virvler fra tuppen av vingen vises ved hjelp av røyk bak et fly. Kilde: Wikipedia [9]

Det er i grove trekk tre ting man kan gjøre for å minimere løft-indusert motstand på en løftende flate.

Det første – og desidert viktigste trikset – er å ha så høyt aspektforhold som overhodet mulig.

Aspektforholdet er definert som forholdet mellom spennet på vingen (avstand fra vingetupp til vingetupp) delt på gjennomsnitts chordlengde. Energieffektive fly har *alltid* vinger med høyt aspektforhold. Fly som ikke har et høyt aspektforhold, er som regel designet for god manøvrerbarhet på bekostning av energieffektivitet. Effekten av høyt aspektforhold kan sees ved noen eksempler fra flyindustrien. Et Cessna 172 har et aspektforhold på 7,32 og løft delt på motstand (LD forhold) er omtrent 10,9 [10]. Et seilfly av typen DG Flugzeugbau DG-800 har derimot et aspektforhold på 27,5 og LD forhold på 50. Det vil si at motstanden relativt til vekten av fartøyet er nesten 4,5 ganger høyere for Cessna 172 enn for DG Flugzeugbau DG-800.



Cessna 172

Aspektforhold: 7,32

Løft / motstand: 10.9



Lockheed U-2

Aspektforhold: 11

Løft / motstand: 25,6



DG Flugzeugbau DG-800

Aspektforhold: 27,4

Løft / motstand: 50

Det er i prinsipp to ting som begrenser aspektforholdet på en hydrofoilbåt. Det første er praktiske forhold. For å ha en bred vinge må man også ha en bred båt. Det er begrenset hvor bred man kan gjøre båten før det blir praktiske problemet ved å f.eks. legge til kai. Hvis båten er for bred relativ til lengden vil det etterhvert også bli utfordrende å greie take-off, da motstanden på skrogene vil øke etterhvert som lengden reduseres. En like viktig begrensing er styrken på vingen. Jo høyere aspektforholdet er jo vanskeligere er det å få nok styrke i vingen. For båtene prosjektert i dette prosjektet har vi økt bredden noe i forhold til en konvensjonell båt for å oppnå høyere aspektforhold. Styrkebegrensninger er primært årsaken til at bredden ikke er økt i større grad.

Etter å ha økt spennet så mye som mulig er neste triks å optimere fordelingen av løft over spennet.

Avhengig av aspektforhold er forskjellen på optimal løft-fordeling og den enkleste formen for løft-fordeling (rektangulær vinge med konstant foilprofil) opp mot 12% for fly [11]. For hydrofoiler kan forskjellen være enda større avhengig av dypgang. Den nøyaktige formen på løftet som fører til minste mulig motstand blir funnet som en del av optimeringen av vingedesignet (se neste seksjon).

For å variere løftet må også foilprofilene variere langs med spennet på vingen. Optimering av løft og design av foilprofiler er dermed en koblet prosess

Siste triks for minimering av løft-indusert motstand er designet av vingetuppen. Det finnes flere typer vingetuppinnretninger som reduserer løft-indusert motstand. Den vanligste typen kalles «winglets» og er i bruk på de fleste moderne passasjerfly. Winglets er en vertikal forlengelse av vingetuppen, som i praksis fungerer ved at det effektive spennet blir større. En hydrofoilsystemet trenger støtter som kobler vingen til skroget. For hydrofoilsystemet designet for dette prosjektet er det nødvendig med 4-støtter. For å minimere løft-indusert motstand har vi valgt å designe de ytterste støttene som kombinert «winglet» og støtte. Det vil si at de ytterste støttene er utformet som en del av hovedvingen, og løftfordistribusjonen varierer også oppover de ytterste støttene.



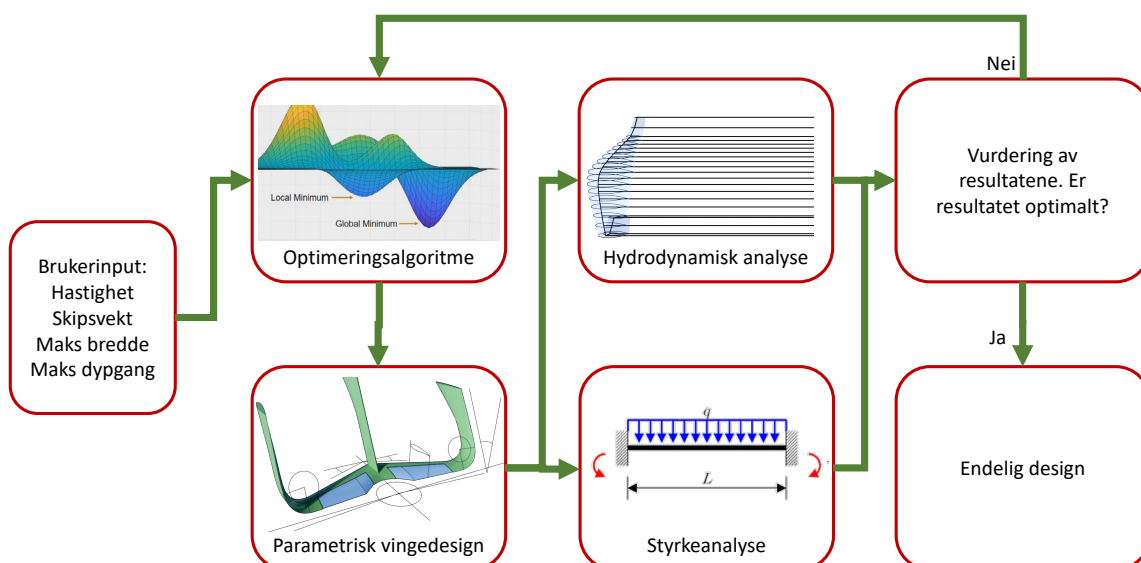
Figur 16: Winglet på en Airbus A350



Figur 17: Kombinert winglet og støtte på Flyer 30

Optimering av design ved hjelp av spesialutviklet programvare

Flying Foil AS har de siste 3 årene jobbet med å kommersialisere vingedesignteknologi som er utviklet som en del av forskning på NTNU. Designet av hydrofoilsystemet skjer ved hjelp av en spesialutviklet programvare som bruker designteknikken beskrevet i forrige seksjon. Hele designet av hydrofoilsystemet blir optimert ved hjelp av spesiallagde simuleringsmetoder og optimeringsalgoritmer. Input til optimeringen er skipsvekt, designhastighet, maks dybde og maks bredde. En grafisk illustrasjon av optimeringsprosessen kan sees i figuren under.



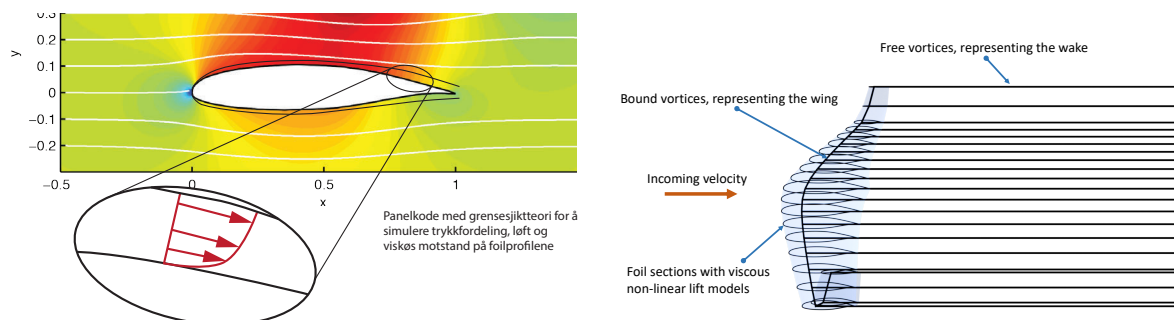
Proessen med å optimere et vingedesign består først av å velge en parametrisk modell av vingegeometrien. I modellen som brukes i dette prosjektet har vi valgt en U-formet hovedvinge hvor foilprofilene langs med hele spennet av vingen kan variere. Dette gjør at både chord-lengde, foilgeometri og angrepsvinkel er variabler i optimeringsprosessen.

For å velge verdien på parameterne brukes en optimaliseringsalgoritme. Denne algoritmen søker etter en optimal kombinasjon av parametere. Hva som er optimalt måles ved hjelp av en «målfunksjon» med flere krav:

- Motstanden på hydrofoilsystemet skal være så lav som mulig
- Løftet som blir generert fra hydrofoilsystemet må være stor nok til å bære hele vekta av båten
- Hydrofoilsystemet skal ikke oppleve kavitasjon i designhastighet
- Hydrofoilkonstruksjonen må være sterk nok til å takle alle krefter det blir utsatt for
- Hydrofoilkonstruksjonen må være mulig å bygge med tilgjengelige konstruksjonsmetoder

Det er viktig å ta med alle disse kravene. Det er fullt mulig å komme opp med mer energieffektive vingedesign hvis man neglisjerer enten kavitasjonsproblematikk eller styrkekrav. **En vinge som er veldig energieffektiv, men som ikke er sterk nok til å bære vekta av båten, eller som eroderes vekk på grunn av kavitasjon er naturlig nok lite interessant.**

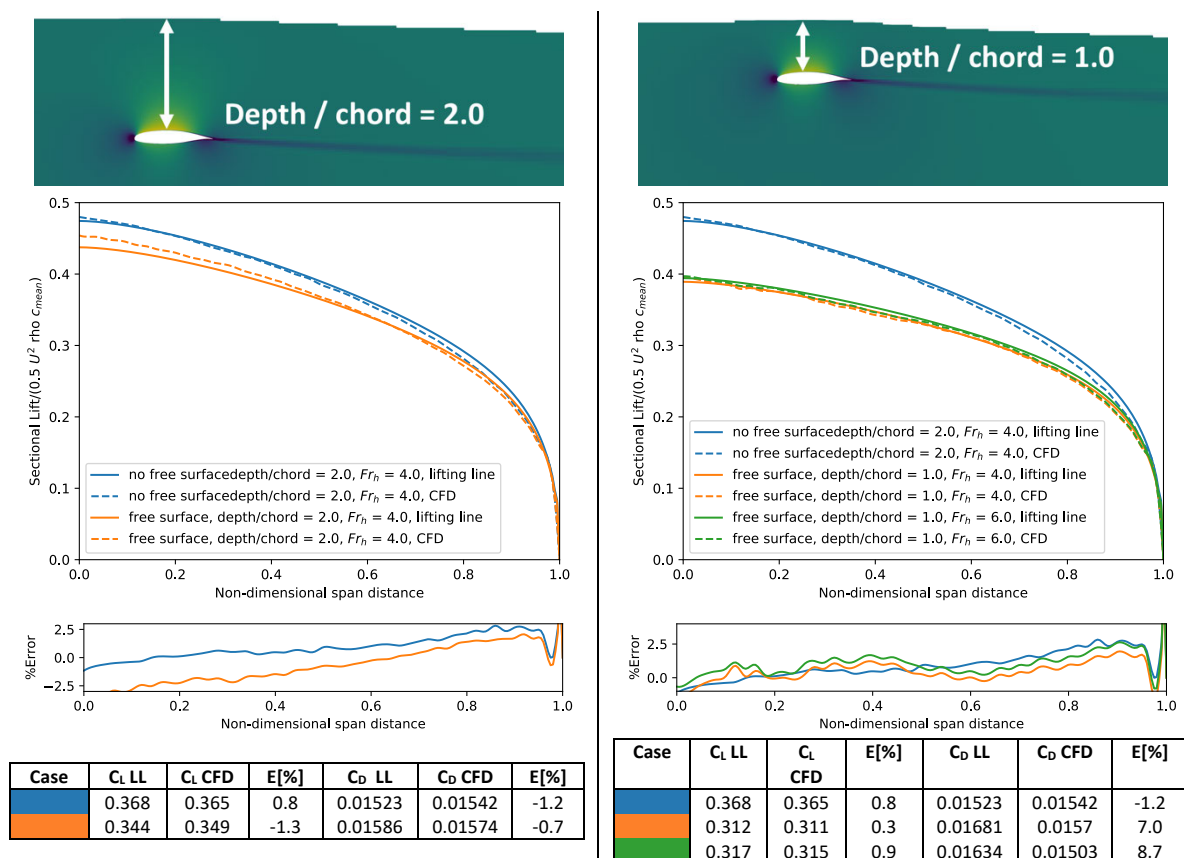
Optimaliseringsalgoritmen må i praksis teste mange forskjellige kombinasjoner. I et typisk prosjekt blir flere tusen forskjellige vingedesign testet før det optimale blir valgt. For at dette skal gjennomføres innen et overkommelig tidsrom har Flying Foil utviklet spesialiserte simuleringsmetoder. Disse metodene er laget for å estimere både hydrodynamiske krefter, trykkfordeling og styrke i vingen på en rask og effektiv måte, samtidig som de må ha høy nøyaktighet. De spesifikke metodene i design-simuleringspakken til Flying Foil er en panelkode med grensesjikt teori for trykkfordeling, ikke-linear løftelinje med modellering av effekt av fri overflate for hydrodynamiske krefter og bjelketeori for styrke. Dette gjør at et vingedesign kan evalueres i løpet av sekunder mot potensielt flere dager om man f.eks. skulle brukt CFD simuleringer til å gjøre samme jobben. Nøyaktigheten til simuleringsmetodene er erfaringsmessig innenfor noen prosent av hva man får ved mer avanserte simuleringsmetoder [12].



Resultatet av optimeringen er en komplett beskrivelse av geometrien til hydrofoilsystemet under vann. Denne geometrien vil så videre bli testet for både motstand og styrke av etablerte ingeniørmeter for å verifisere egenskapene til designet. I de neste seksjonene kommer beskrivelse og resultater fra de testene som har blitt gjennomført for vingedesignet i dette prosjektet.

Motstand og energiforbruk

Simuleringsmetodene som brukes i optimaliseringsprosessen regner ut både løft og motstand på vingen som funksjon av hastighet og dypgang. Basert på tidligere valideringsstudier vet vi at våre spesialutviklede simuleringsmetoder gir nøyaktige resultater, som vi blant annet viser i artikkelen i referanse [12]. Denne artikkelen ble skrevet i løpet av prosjektperioden og sammenlikner resultater fra vår spesiallagde simuleringsmetode med en mer avansert – men også mer tidkrevende – simuleringsmetode kalt «Computational Fluid Dynamics» (CFD). I Figuren under vises hovedresultatene fra denne artikkelen. Forskjellen mellom metodene er under 2% når dybdeforholdet til hydrofoilsystemet er tilsvarende verdien for Flyer 20 og Flyer 30.

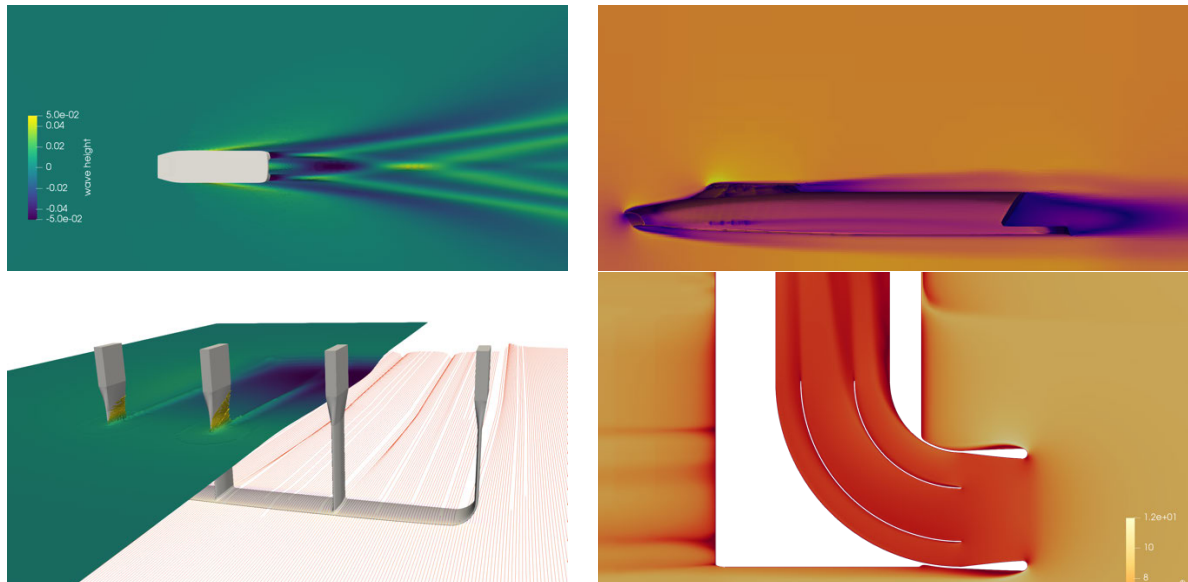


Figur 18: Resultater fra validering av Flying Foil sin forenklete modell som brukes til å regne ut løft og motstand på hydrofoiler i designfasen. Øverste figur viser et to-dimensjonalt tverrsnitt av vingegeometrien for illustrasjonsformål, men vingen i simuleringen er egentlig er tre-dimensjonal. Under ser man løftfordelingen langs spennet av vingen (bredden av båten) – fra midten og utover – og det lokale avviket mellom forenklet modell og CFD-simulering.

Så lenge båten flyer trengs det i teorien ikke mer for å regne ut energiforbruket til en hydrofoilhurtigbåt. Likevel er alle tall vi presenterer for motstand og energiforbruk i denne rapporten basert CFD-simuleringer. Dette gjøres i hovedsak for å validere resultatene fra designprosessen, men også for å kunne vise til resultater fra simuleringsoppsett basert på etablerte og standardiserte metoder. I tillegg må vi bruke CFD for å analysere motstand på skroget, som har stor innvirkning på motstanden før take-off-hastighet.

Simuleringene vi har gjort i dette prosjektet er gjort med programvaren OpenFOAM [13]. Simuleringene gjort i dette prosjektet som består av flere titalls millioner med små fluid volumer rundt geometrien. Effekt av både fri overflate og turbulente strømminger simuleres med metoder som er velprøvd og validert i både i akademia, og industri over flere tiår. Nøyaktigheten til CFD

simuleringer er sterkt avhengig av hvordan man setter innstillingene. Oppsettet som er brukt i dette prosjektet er basert på anbefalte innstillinger fra flere års forskning på NTNU, og programvare utviklet av Flying Foil for automatisert CFD oppsett. Beskrivelse av oppsettet er oppgitt i seksjonen under, for å synliggjøre hva tallene vi presenterer er basert på. Denne seksjonen er i hovedsak ment for de med kunnskap – eller interesse – om CFD simuleringer. Hvis detaljene i CFD simuleringene ikke er av interesse kan man hoppe videre til resultatseksjonen. Her viser vi beregnet motstand for både Flyer 20 og Flyer 30, og sammenlikner tallene med konvensjonelle hurtigbåter.



Figur 19: Noen visualiseringer fra CFD simuleringer. Fra øverst til venstre: skrogssimuleringer, simulering av luftmotstand, simulering av krefter på hovedvinge og simulering av halen med vannjetinntak

Simuleringsparametere

OpenFOAM er en programvare basert på åpen kildekode («open source») og kan brukes til å simulere differensiallikninger ved hjelp av «finite volume» metoden. Den mest brukte applikasjonen til OpenFOAM er løsning av Navier-Stokes likninger som beskriver strømning av gass og væske. OpenFOAM er en av de mest populære CFD kodene i verden, og inneholder samme type funksjonalitet – numeriske metoder, fysiske modeller og post-prosesseringsverktøy - som kommersielle CFD koder som Star CCM+ og Fluent.

Simuleringene som er gjort i dette prosjektet er basert på Reynolds Average Navier-Stokes (RANS) turbulensmodellering og «Volume of Fluid» (VoF) for å modellere fri overflate. Alle simuleringene av hydrofoilsystemet er gjort i fullskala (40 knop, 30 m lang båt, 1 m chord lengde) for å fjerne eventuelle feil på grunn av skalaeffekter. Simuleringer av skrog er gjort med en nedskalert modell på 4 m, hvor så resultatene er oppskalert med standard skaleringsmetoder for skrog. Vi har antatt at strømningen er fult turbulent. Løseren som er brukt er kalt «interFOAM» i OpenFOAM biblioteket, som løser likningene ved hjelp av en vanlig CFD-algoritme kalt «Pressure-Implicit with Splitting of Operators» (PISO).

Domene som simuleres består av mange små volum-elementer distribuert rundt geometrien. Samlingen av disse volum-elementene er kalt et «mesh» og oppløsningen i «meshet» har mye å si for nøyaktigheten i simuleringen. For å sørge for tilstrekkelig oppløsning i alle simuleringer brukes et automatisert simuleringsoppsett hvor simuleringsparameter er satt ut fra geometri, hastighet og fysiske parametere som viskositet og gravitasjonsakselerasjon. Det er i prinsipp 4 nivåer av mesh-oppløsningskontroll; lagtykkelse og antall i det viskøse grensesjiktet, oppløsning rett utenfor viskøst grensesjikt, oppløsning rett bak geometrien som blir teste, og groveste oppløsning ellers i domenet.

Lagtykkelse og antall er regnet ut fra den dimensjonsløse parameteren Reynoldstall (som måler forhold mellom viskøse krefter og treghetskrefter), antatt grensesjikttykkelse (som er avhengig av Reynoldstall) og anbefalt distanse fra vingegeometrien i for å beregne rett friksjonsmotstand i forhold til de fysiske modellene som blir brukt i simuleringen (rett y^+ verdi i forhold til turbulensmodell og veggfunksjon, regnet ut med en empirisk friksjonslinje). Oppløsningen ellers i domenet er primært bestemt av geometrien. Rett utenfor grensesjiktet må oppløsningen være tilstrekkelig til å representere vingegeometrien på en god måte. Rett bak geometrien som testes må oppløsningen være strekkelig til å fange virvler og andre strømningsstrukturer som skapes. Oppløsningen ellers i domenet er primært satt med ønske om å ikke ha for stor forskjell på aller finest oppløsning og aller grovest oppløsning. Oppløsningen i disse områdene er satt ut fra tidligere erfaringer og fysiske mål på geometrien.

Tidssteget i simuleringen blir justert automatisk for å sørge for stabil simulering ved å tilpasse det til lokal hastighet i hver enkelt celle, relativt til størrelsen på cellene (tidssteget er justert for et maksimalt Courant-tall)

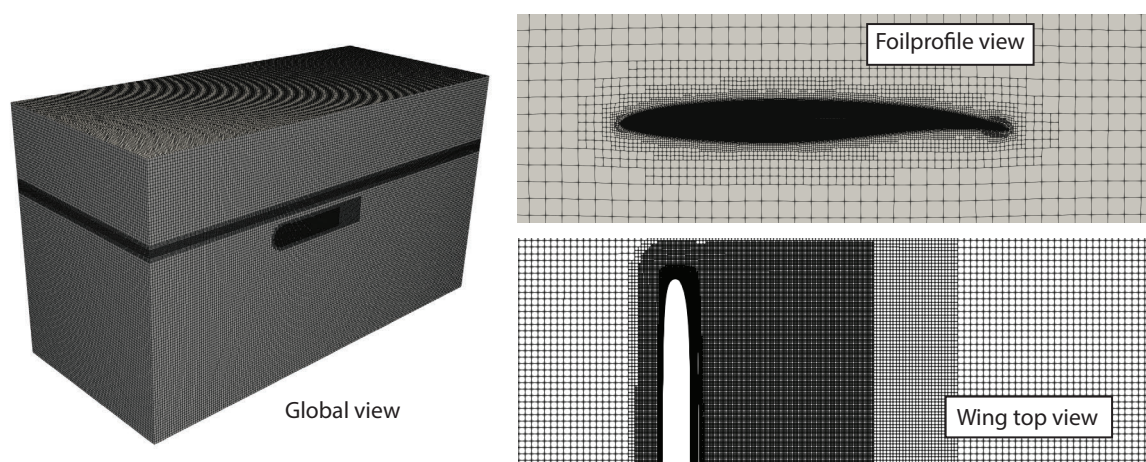
Simulering- og meshparametere er listet opp i tabellen under. I denne tabellen er «L» en referanse til den representative lengden på geometrien. For vinger er dette chordlengden, mens for skrog er det lengden i vannlinjen. «U» er hastighet i simuleringen.

Simuleringsparameter	Vinge- og halesimuleringer	Skrogsimuleringer
OpenFOAM løser	interFoam	interFoam
Mesh generator	snappyHexMesh	snappyHexMesh
Derivert i rom	Gauss linear upwind	Gauss linear upwind
Integrering i tid	Euler	Euler
Turbulensmodell	k-omega SST	k-omega SST
Turbulensintensitet ved inletet	1%	1%
Fri-overflate modellering	VoF med MULES	VoF med MULES
Beregnet y^+ verdi, første lag i grensesjiktet	100	60
Antall lag i grensesjiktet	Min 6 max 25	Min 6 max 25
Veggfunksjon	Spalding	Spalding
Maks celle-lengde / L rett utenfor grensesjiktet	0,002	0,001
Maks celle-lengde / L bak geometrien	0,032	0,004
Maks celle-lengde / L ved fri overflate	0,064	0,004
Maks celle-lengde / L ellers i domenet	0,128	0,128
Maks courant-tall	10	10
Maks tidssteg • U / L	0,005	0,005
Simuleringstid • U / L	20	15

I figuren under er meshet for hovedvingen illustrert. Samme automatisert prosess har også blitt brukt for simulering av motstand på halen og skroget. Totalmotstanden på båten har blitt beregnet ved å kjøre flere CFD simuleringer, hvor vinge, hale og luftmotstand på skrog og overbygg er analysert hver for seg. Dette har vi gjort for å minske størrelsen på simuleringene, samtidig som dette gir en god approksimasjon på totalmotstanden. Størrelsen på meshet for simuleringene av hovedvingen og halen består av ca. 20 og 10 millioner celler. Skrogsimuleringer var gjort med et mesh på ca. 6 millioner celler. Luftmotstand ble simulert med tilsvarende oppsett som skrogsimuleringene, men fri overflate ble neglisjert da dette har liten til ingen effekt på resultatet.

For å finne motstand som funksjon av hastighet har vi også kjørt simuleringer av skroget. Før take-off er skroget hovedkilden til motstand. Vi har antatt at motstand fra skrog og vinge kan superponeres for å lage en komplett motstandsmodell. I tillegg har vi gjennomført CFD simuleringer av konvensjonelle skrog for sammenlikningstall. Vi kan også estimere motstanden på fullskala hurtigbåter ved å benytte motoreffekt, hastighet og estimert propulsjonsvirkningsgrad.

Sammenlikning mellom den type beregning og CFD simuleringer tyder på at CFD simuleringer av hurtigbåter er innenfor et par prosent i nøyaktighet.

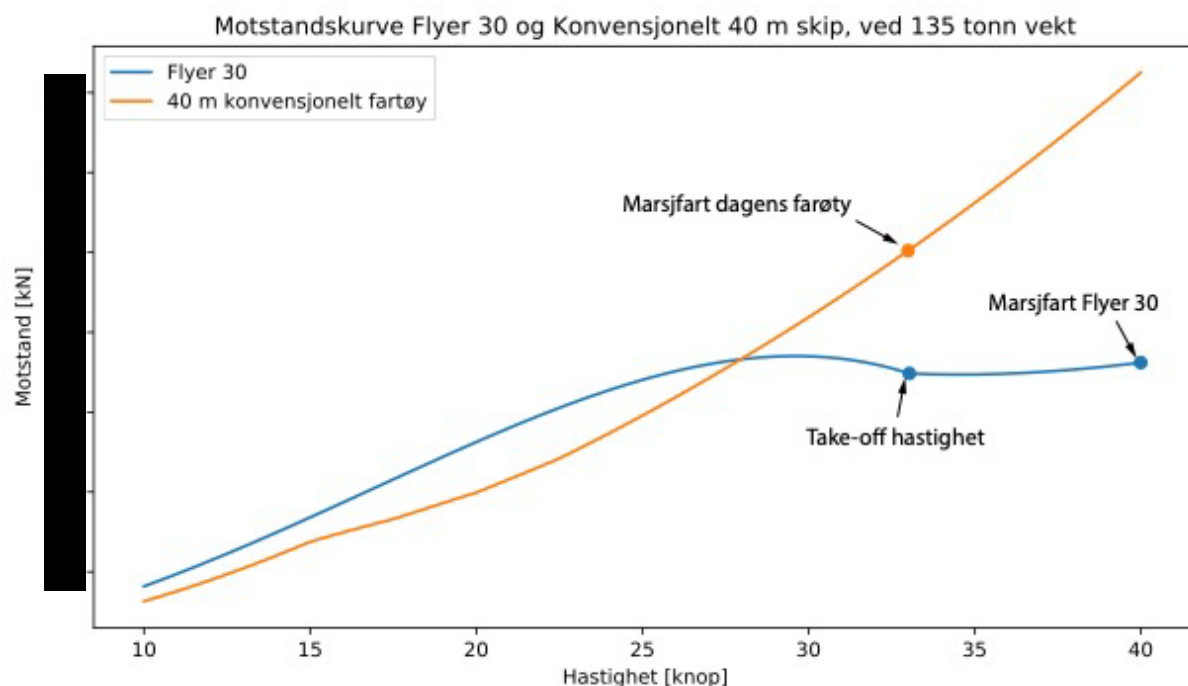


Figur 20: Illustrasjon av simuleringsmeshet som ble brukt for test av hovedvingen

Resultater fra CFD analyse

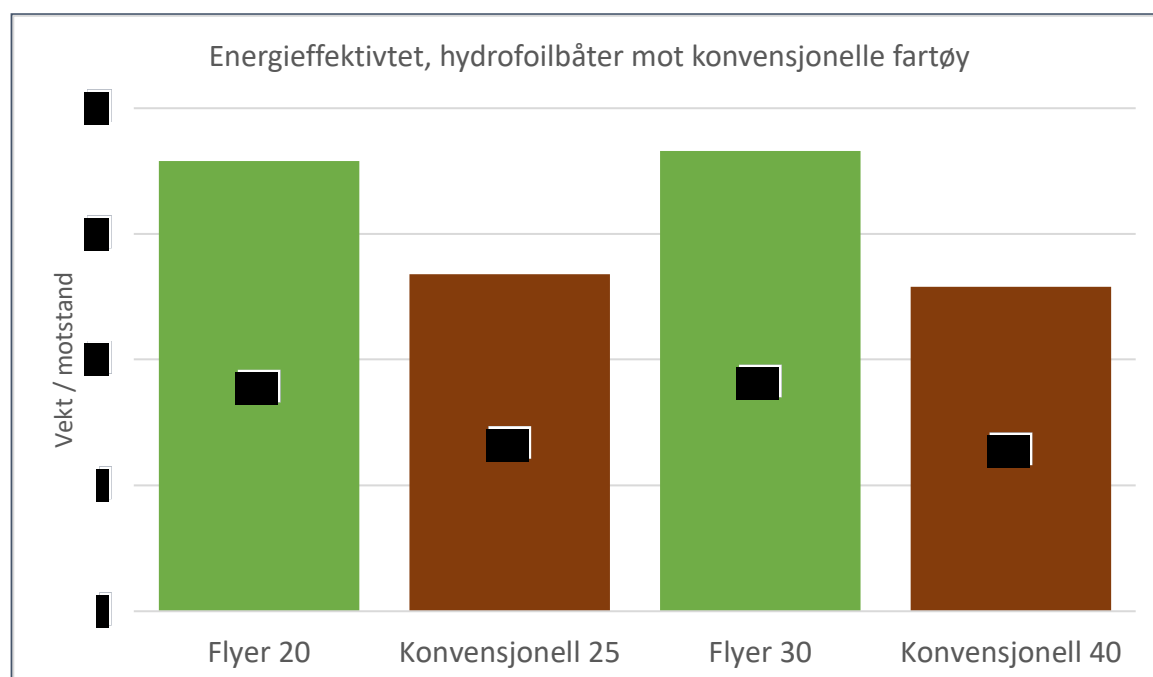
Basert på metodene forklart i forrige seksjon har vi estimert motstanden til både Flyer 20 og Flyer 30. Flyer 30 er analysert som funksjon av hastighet, mens Flyer 20 er primært analysert i marsjfart. Ved veldig lave hastigheter er kreftene på hydrofoilsystemet neglisjerbare. De bidrar hverken til mye løft eller til mye motstand. Etterhvert som hastigheten øker vil løftet fra hydrofoilsystemet gradvis øke. Dette fører til at skroget løfter seg gradvis ut av vannet. Det vil si at hydrofoilsystemet kan hjelpe til med å redusere motstanden på fartøyet selv før farten er stor nok til at fartøyet kan fly. For å få til en mer energieffektiv take-off benytter vi styreflatene på hovedvingen til å øke løftet relativt til hastigheten før vi når designhastigheten til fartøyet. Hydrofoilsystemet designet for Flyer 20 og Flyer 30 kan øke løftet med 50% ved hjelp av styreflatene. Når styreflatene er satt til maks løft er motstanden på hovedvingen omtrent 30% høyere relativt til hastigheten (motstandskoeffisienten er 30% høyere).

Som sammenlikningsgrunnlag har vi brukt konvensjonelle skrog med henholdsvis 25 og 40 m lengde. Dette kommer av Flyer 20 og Flyer 30 har kortere skrog enn hva som ville vært naturlig for en konvensjonell hurtigbåt. Vingedesignet er testet med vekten til en fullastet båt. Motstanden til de konvensjonelle skrogene er estimert ved samme vekt. Sammenlikningen antar altså forskjellige fartøy med nøyaktig samme vekt. Resultat av CFD analysene gjort for Flyer 30 i dette prosjektet er plottet i Figur 21. Denne figuren viser hvordan motstanden til Flyer 30 er noe høyere enn motstanden til et konvensjonelt skrog i hastigheter opp til 25 knop. Etter dette er derimot motstandskurven for Flyer 30 ganske flat, mens motstanden til et konvensjonelt skip øker kraftig. I 40 knop har Flyer 30 rundt halvparten av motstanden til et 40 m konvensjonelt skrog. Sammenliknet med et konvensjonelt skrog i 33 knop er forskjellen ca 30%. Med andre ord, selv om vi har økt hastigheten til Flyer 30 til 40 knop så er den fortsatt 30% mer energieffektiv enn et konvensjonelt skrog med samme vekt. Som vi vil vise senere så har energieffektiviteten til et fartøy mye å si for vekten av kraftforsyningen ombord. I realiteten vil et konvensjonelt skip som er dimensjonert for å ha samme rekkevidde som Flyer 30 være betydelig tyngre. Dette vil – som vi skal vise etterhvert i denne rapporten – øke forskjellen på energieffektiviteten enda mer.



Figur 21: CFD analyse av Flyer 30 og konvensjonelt 40 m langt skrog

Den primære kilden til motstand i marsjfart er hovedvingen, som generer rundt 70% av totalmotstanden. Halen bidrar med rundt 27% mens luftmotstand er estimer til å kun være 3% av totalmotstanden. Det desiderte viktigste tiltaket til en energieffektiv hydrofoilbåt er altså å ha en energieffektiv hovedvinge. I figuren under vises også resultater for Flyer 20 og et 25 m langt konvensjonelt skrog i design hastighet. I denne figuren har vi valgt å plote relativt motstand via Løft delt på motstand, kjent som LD-forholdet (Lift over drag på engelsk). Dette tallet er relevant da det brukes videre inn i dimensjoneringen av kraftforsyningen senere i denne rapporten. Tallet er vekten av skipet delt på motstanden i designhastighet. Jo høyere dette tallet er, jo mer energieffektiv er fartøyet. Tallet som presenteres i denne rapporten er et resultat av sluttanalysen av designet. Dette tallet har gått igjennom flere justeringer i løpet av prosjektperioden etterhvert som designet og dermed også energieffektiviteten endret seg.



Vingekonstruksjon

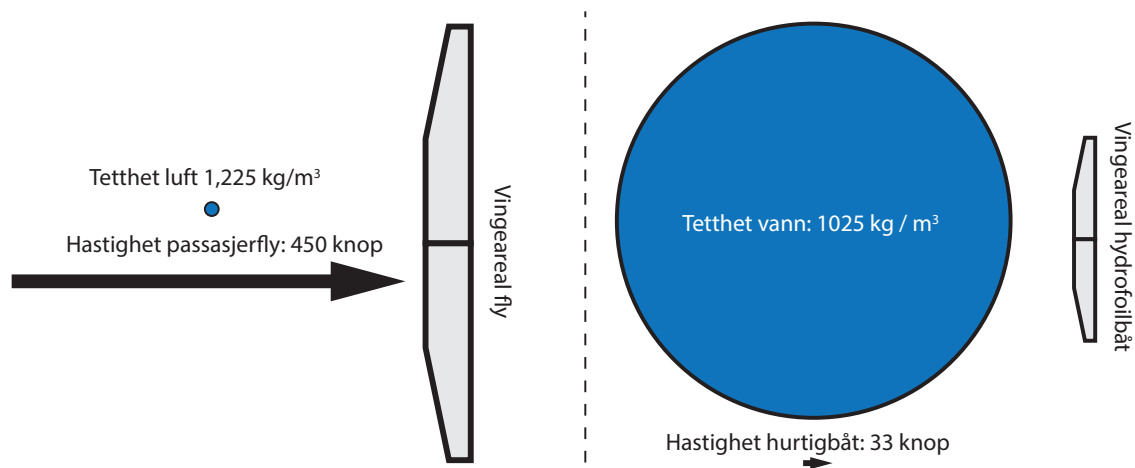
Tidligere hydrofoilbåter har brukt enten aluminium eller rustfritt stål som konstruksjonsmateriale. Dette har ført til at selve hydrofoilsystemet har blitt både tungt og dyrt. I dette prosjektet har vi undersøkt muligheten for å bygge vingen ut av karbonfiber. Mer spesifikt så har vi undersøkt muligheten for å bygge hele vingesystemet ved hjelp av eksisterende infrastruktur på verftene til Brødrene Aa i Hyen og Eikefjorden. Karbonfiber gir større fleksibilitet i forhold til hva slags vingeform det er mulig å skape sammenliknet med f.eks. rustfritt stål som konstruksjonsmateriale, samtidig som både vekt og kostnader blir betydelig redusert. Karbonfiber har overlegen styrke relativt til sin egen vekt. Avanserte former kan skapes på en billig og effektiv måte ved at geometrien først produseres ut av mykt skum ved hjelp av CNC fres med enten 3 eller 5 akser. Skumformen kan så enten kles med karbonfibermatter direkte, eller brukes til å lage en form hvor man kan støpe flere kopier i karbonfiberlaminat.

Likevel har karbonfiber noen utfordringer relativt til metaller. Ettersom karbonfiberkompositt består av to forskjellige materialer – karbonfiber som henger sammen ved hjelp av en plastmatrise av f.eks. epoxy, vinylester eller polyester – så oppfører det seg på noen måter annerledes enn metallkonstruksjoner som har en (mer) homogen struktur. Karbonfiberkompositt har sammenliknbar absoluttstyrke i strekk som mange typer rustfritt stål, men i trykk er det derimot vesentlig svakere. Mens det er lett å lage strukturer av karbonfiber som takler store globale belastninger er det vesentlig større utfordringer hvis belastning blir påført materiale i et lite konsentrert området. Hvis belastningen blir påført på et så lite område at fibre i kompositten ikke opplever deformasjon er det kun styrken i plastmatrisen som er gjeldende. Vinylester har omtrent 3% av styrken til karbonfiberlaminat, og rundt 1% av styrken til karbonfiber alene. Dette gir blant annet utfordringer med erosjon enten på grunn av kavitasjonsbobler som kollapser på strukturen eller på grunn av sandpartikler i vannet som treffer vingen i høy hastighet når båten går i marsjfart.

Disse utfordringene har blitt undersøkt i dette prosjektet, og løsninger har blitt funnet. Det ser ut til å være fullt mulig å støpe hydrofoiler for en hurtiggående passasjerferge i karbonfiber, gitt at man gjør det på rett måte og tilpasser designet til konstruksjonsmateriale. I denne seksjonen skal vi gå igjennom konstruksjonsdesignet av hydrofoilstrukturen, utfordringene vi har oppdaget i løpet av prosjektet, og løsningene. Mesteparten av det som presenteres i denne seksjonen er regnet som sensitiv informasjon, og har derfor blitt fjernet fra den offentlige versjonen av rapporten.

Vingestruktur

Strukturutfordringen for flyvinger og hydrofoiler har flere likheter men også noen fundamentale forskjeller. Et middels stort passasjerfly og en stor hurtigbåt veier omtrent det samme; passasjerflyet Airbus A320 Neo har maks take-off vekt på 97 tonn [14], mens MS Terningen veier omtrent ██████ tonn fullastet med 275 passasjerer. Det vil si at løftet produsert fra flyvingen til Airbus A320 Neo og en hydrofoilversjon av MS Terningen er omtrent like stort. Løft fra en vinge er omtrent proporsjonalt med hastigheten i andre multiplisert med tettheten til mediet vingen befinner seg i. Basert på dette kan vi sammenlikne nødvendig vingeeareal for et passasjerfly og en hurtigbåt som veier omtrent det samme. Forskjellen er illustrert i figuren under:

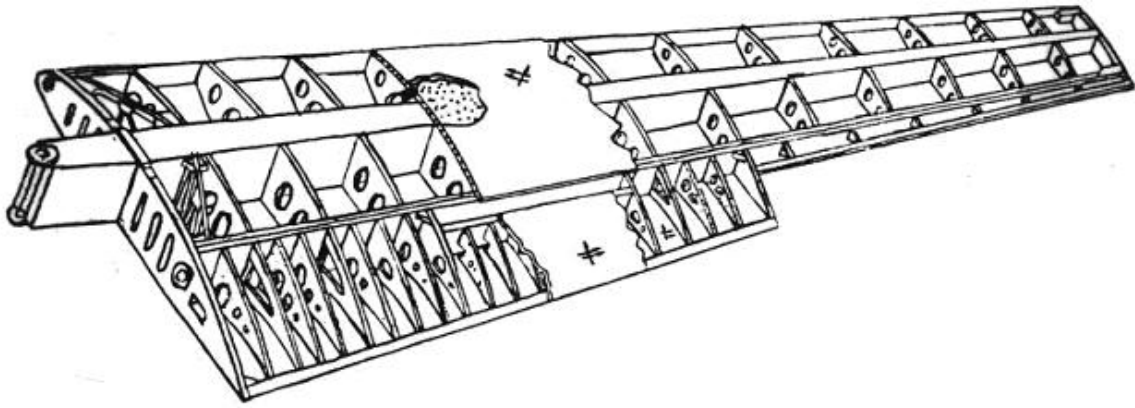


Figur 22: Forskjell i tetthet, hastighet og nødvendig vingearreal, passasjerfly og hurtigbåt

Vingeararealet til en hydrofoilbåt ender opp med å være omtrent $\frac{1}{4}$ av hva som ville vært tilfelle for et typisk passasjerfly. Likevel må strukturen bære den samme vekten som en flyvinge. Det vil si at de samme kreftene må fordeles over en mye mindre struktur, som i noen tilfeller er utfordrende. Målet med designet av en flyvinge er å finne konstruksjoner som er så lette som mulig samtidig som styrken er tilstrekkelig. For en hydrofoilbåt er vekt et mindre problem – i alle fall hvis den skal bygges ut av komposittmaterialer. En hydrofoilstruktur av kompositt – selv med tykt lag med laminat – er så lett at den har omtrent nøytral oppdrift når den er nedsenket i vann. Utfordringen ligger i å få plass til nok materiale på innsiden av vingen til at vingestrukturen blir sterk nok. Dette er ikke trivielt. Designprogramvare til Flying Foil AS tester vingestruktur for alle iterasjoner av designprosessen. Om vingedesignet viser seg og være for svakt må i praksis chordlengden øke, noe som fører til mer motstand. I en typisk designprosess – og spesielt i en design prosess hvor båten blir ekstra tung på grunn av batterier – er styrken til vingen en drivende faktor i optimeringen.

En vinge er i praksis en bjelke som blir utsatt for krefter. Kreftene kommer primært fra løftet som blir produsert av vingen, men kan også komme av bølgeinduserte krefter og kollisjoner med flytende objekter i vannet. Styrken til en bjelke er avhengig av både materiale den er bygd av og tverrsnittsgeometrien. For å skape en bjelke med så stor styrke som mulig må man maksimere *arealtreghetsmomentet* til den bærende delen av konstruksjonen.

Tverrsnitt med høyt arealtreghetsmoment har mesteparten av arealet sitt langt fra nøytralaksen. Den ytre formen på en vinge er gitt av designet på foilprofilet. For å maksimere arealtreghetsmomentet i den bærende strukturen i vingen er det derfor nødvendig å la så mye av foilprofilet som mulig være en del av den bærende strukturen, og la karbonfiberlaminatet ligge så langt ut mot ytterkanten av vingen som mulig. Det vil si, en vinge med maksimal styrke benytter hele vingegeometrien til bærende struktur. Dette er ofte ikke tilfellet for flyvinger, som ikke har behov for å benytte all tilgjengelig plass i en vinge til bærende elementer. En flyvinge vil ofte derfor bestå av en hovedbjelke på innsiden av vingen, med foilprofilspant, stivere og tynne plater ytterst.

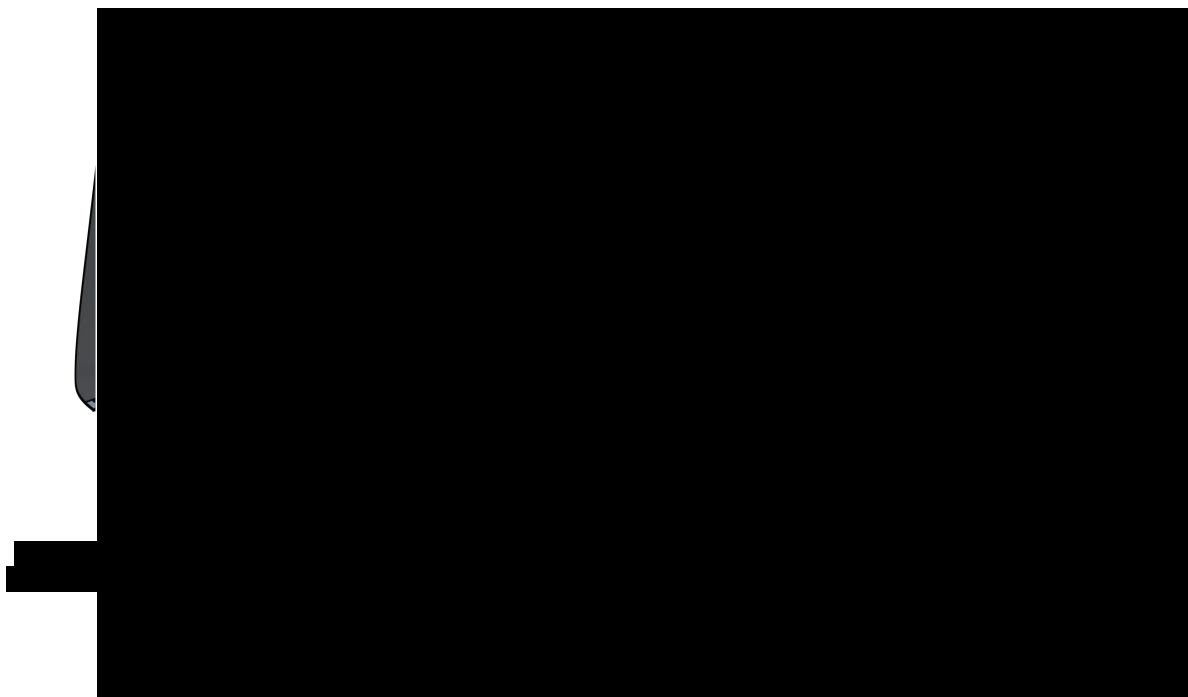


Selv om det er ønskelig å ha så mye styrke som mulig i hovedvingen er det noen praktiske begrensninger. Den bakerste delen av vingen har en veldig slank geometri, som også inneholder styreflater som må opplagres. Denne delen er derfor vanskelig å støpe med høy nøyaktighet når tykkelsen på laminatet er stor.

Vingestrukturen for hydrofoilsystemet består dermed av følgende komponenter:

-
- | Category | Value (approximate) |
|----------|---------------------|
| 1 | 10 |
| 2 | 25 |
| 3 | 40 |
| 4 | 60 |

En illustrasjon av konstruksjonen som er prosjektert for Flyer 30 er vist i figuren under

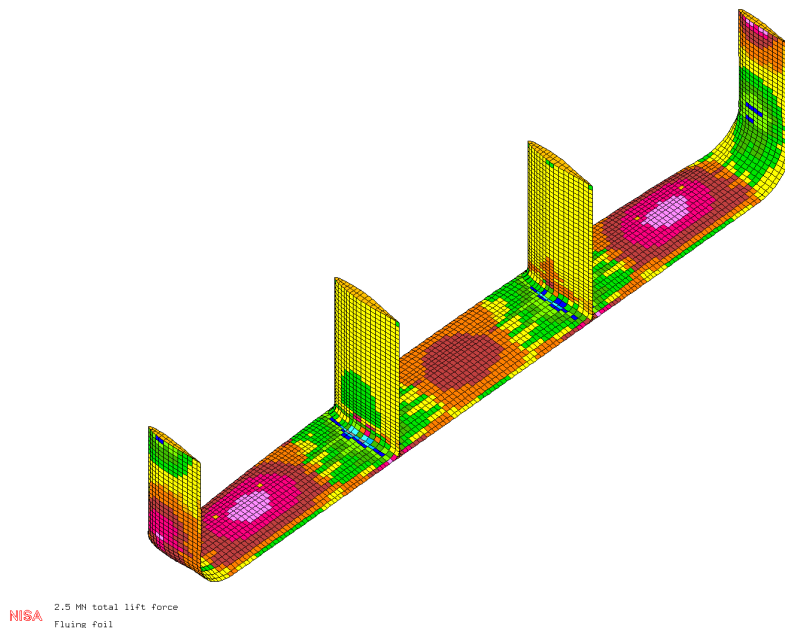


Figur 24: Visualisering av vingestrukturen prosjekter for Flyer 30

Globale belastninger

For å teste denne konstruksjonen har vi i dette prosjektet brukt 3 forskjellige metoder. Under designprosessen brukes bjelketeori for å estimere maks spenninger i materialet. Internt hos Flying Foil AS analyseres også konstruksjonen ved hjelp av isotropisk Finite Element Analysis (FEM) etter endt design prosess for å kontrollregne resultatet. Dette er en type analyse som er nøyaktige for homogene materialer som metaller og ren plast, men som ikke tar hensyn til at karbonfiber har forskjellig stivhet og styrke avhengig av hvilken retning fibrene har blitt lagt. Dette er derfor også kun en grov modell som brukes tidlig i designfasen.

For å teste vingestrukturen med mer nøyaktige materialmodeller har vi i dette prosjektet fått hjelp av eksterne konsulenter fra selskapet FiReCo AS [16]. FiReCo spesialiserer seg på komposittmaterialer og har lang erfaring med hurtiggående fartøy bygget i kompositt for både sivilt og militært bruk. Vingestrukturen ble testet ved hjelp FEM modell hvor retningen på karbonfibrene var med i beregningen. Materialeegenskapene er basert på tester av laminat støpt hos Brødrene Aa. Vingen ble utsatt for en belastning tilsvarende 250 tonn med løft, jevnt fordelt over hele vingen. Dette er betydelig mer enn vekta av båten (), men dette ble brukt for å teste en ekstremsituasjon. Vingen kan f.eks. oppleve midlertidig økt angrepsvinkel på grunn av bølger som – i kort tid – kan øke kreftene på vingen betydelig. Slamming i høy hastighet kan også føre til tilsvarende økt belastning. 250 tonn belastning er likevel regnet som ekstremt. Økt angrepsvinkel på vingen i høy hastighet vil f.eks. føre til at vingen kaviterer, noe som naturlig begrenser mengden løft som kan produseres. Dette er i dette tilfellet en god egenskap (mer om problemer knyttet til kavitasjon i neste seksjon) Et plot som viser spenninger i vingekonstruksjonen etter å ha blitt belastet med 250 tonn er vist i figuren under.

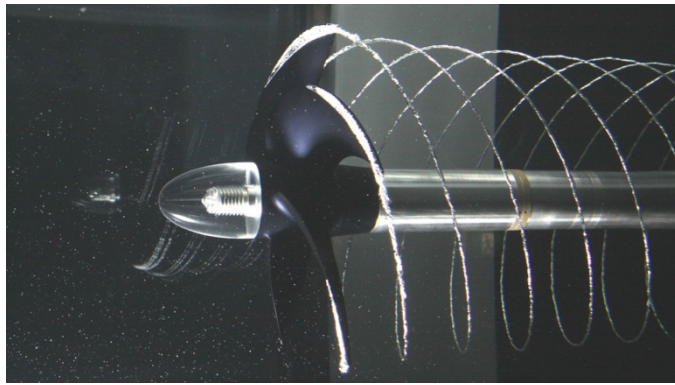


Figur 25: FEM analyse gjennomført av eksternt konsultentselskap

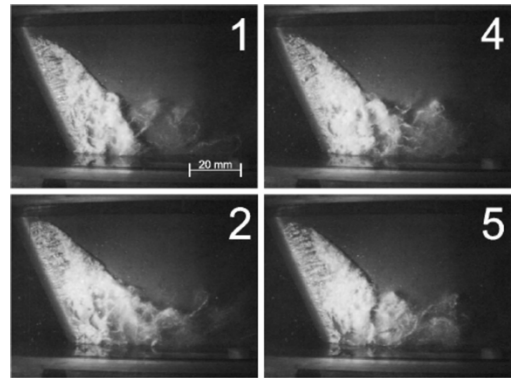
Basert på analysen gjort av FiReCo er spenningene stort sett innenfor en sikkerhetsfaktor på 3 relativt til bruddspenning i laminatet. Gitt at 250 tonn – nesten to ganger vekta av båten – er tilstrekkelig som ekstremlast tyder dette på at vingekonstruksjonen er mer enn sterk nok, relativt til krav til komposittmaterialer i DNV GL High Speed Light Craft koden. Analysen viste kun et problemområde som trenger ekstra forsterkning; koblingen mellom vinge og midtstøttene. Her genereres det svært store spenninger, og for å ha tilstrekkelig sikkerhetsfaktor må dette området ha tykkere lag med karbonfiberlaminat enn resten av vingen. **Konklusjonen fra analysen er at dette fint kan la seg gjøre, og at det er mulig å bygge en karbonfiberving med tilstrekkelig sikkerhetsfaktor i en ekstremsituasjon relativt til sikkerhetskrav.**

Kavitasjonserosjon

Kavitasjon er en av hovedutfordringene til et hydrofoilfartøy, som alle hydrofoildesignere må bruke mye tid på å unngå. Kavitasjon oppstår når trykket blir så lavt at vann går fra å være en væske til å bli en gass (vanndamp), selv ved lav temperatur. Løftet fra en hydrofoil skapes primært ved å senke trykket på oversiden av vingen. Hvor mye trykket synker er sterkt avhengig av hastigheten til hydrofoilfartøyet: jo fortere man går jo lavere blir trykket på oversiden av hydrofoilsystemet og jo større er risikoen for kavitasjon. Foilsystemet designet i dette prosjektet har en fininnstilt trykkfordeling for å kunne operere helt kavitasjonsfritt i designkondisjon. Mesteparten av tiden vil det dermed ikke være noe problem med kavitasjon. Dessverre er det helt umulig å unngå kavitasjon i alle sammenhenger for et hydrofoilfartøy som skal bevege seg i 40 knop.



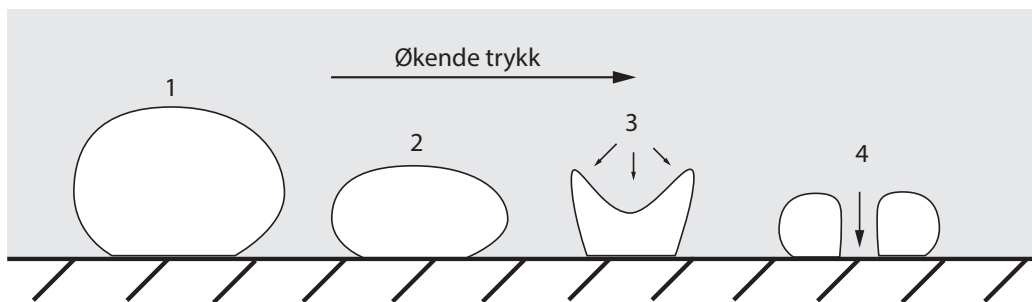
Figur 26: Kaviterende propell



Figur 27: Kaviterende hydrofoil

Angrepsvinkler på vingen fører til lavere trykk på oversiden av foilen, og spesielt helt fremst på nesa. Små angrepsvinkler vil ikke føre til kavitasjon, da foildesignet er laget med marginer mot kavitasjon. Store bølger eller brå manøvreringer vil derimot føre til at kavitasjonsbobler oppstår på hydrofoilsystemet. Når en kavitasjonsboble oppstår på nesa til hydrofoilsystemet er det flere ting som kan skje. Hvis boblene som skapes kun strekker seg over deler av vingen vil løftet på vingen i stor grad bestå, og båten kan fortsette og fly som normalt. Blir derimot kavitasjonsboblene for store kan løftet på hydrofoilen nesten forsvinne helt. Hvis dette skjer vil båten miste flyhøyde, og skrogene vil begynne å subbe i vannet. Dette er forventet å skje svært sjeldent, og konsekvensene hvis det skjer er ikke store. Det verste som skjer er at det oppleves midlertidig litt ubehagelig – omtrent som turbulens på fly – og båten risikerer å miste litt fart

Et større problem på sikt er at kavitasjonserosjon. Dette oppstår når små kavitasjonsbobler kolliderer på vingestrukturen. Kollapsen skaper bittesmå jetter av vann som skyter med høy hastighet inn i strukturen. Dette skaper igjen store spenninger i det lille området hvor bolen kolliderer. En illustrasjon av prosessen er vist i figuren under.



Cavitasjonsboble imploderer i nærheten av en fast overflate, noe som generer en jet av vann fra den omkringliggende væsken ned på den faste overflaten. Dette skaper store spenninger lokalt der hvor jetten kolliderer med den faste overflaten

Figur 28: Skapelsen av kaviatsjonsjet fra en kollapsene boble

Hvis spenningene som skapes på grunn av kollapsene kavitasjonsbobler er store nok til å skade materialet oppstår det en liten lokal skade. Om dette skjer mange nok ganger, potensielt over lang tid, kan summen av skader bli omfattende. Dette er et problem som både pumper, propeller og turbiner opplever. Eksempler på skader på grunn av kavitasjonserosjon er vist i bildene under.



Figur 29: Kavitasjonserosjon på en Francis turbin

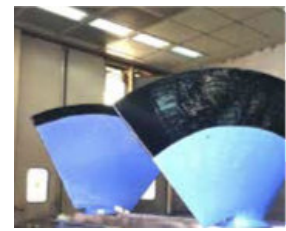


Figur 30: Kavitasjonserosjon på en hydraulisk pumpe

Forskjellige materialer har forskjellig motstandsevne mot kavitasjonserosjon. Myke materialer som plast, og til og med myke metaller som f.eks. aluminium, har dårlig motstandsevne mot kavitasjonserosjon. Harde materialer som rustfritt stål har derimot svært god motstandsevne. Karbonfiber – og alle andre typer komposittmaterialer basert på plastmastriser – har ekstremt dårlig evne. Årsaken er at kreftene som oppstår på grunn av en kollapsene kavitasjonsboble er så lokale at det i mange tilfeller kun er plasten mellom selve karbonfibrene som blir utsatt for spenninger. Dermed er det plastens evne til å motstå kavitasjonserosjon som blir gjeldende. Basert på artikkelen i referanse [17] så vil karbonfiber erodere vekk omtrent 4 ganger fortere enn aluminium og hele 300 ganger fortere enn rustfritt stål. **Med andre ord, hvis man bygger vingen ut av karbonfiber - uten å beskytte den på en eller annen måte fra kavitasjonserosjon – så vil levetiden til vingestrukturen mest sannsynlig være svært kort.**

Løsningen på dette problemet er heldigvis relativt enkel: vingen må ha ett beskyttende lag på utsiden av karbonfiberlaminatet for å hindre kavitasjonserosjon. Dette kunne i teorien vært tynne plater av enten rustfritt stål eller titan som er bøydd etter formen på vingen. En løsning som mest sannsynlig er både enklere og bedre er å bruke et stoff som kalles elastomer. Elastomerer er stoffer som kan utsettes for ekstrem deformasjon uten å ta skade av det. De finnes i svært mange varianter, med forskjellig styrke og stivhet. Gummi er et eksempel på en naturlig elastomer som brukes i hverdagen.

For beskyttelse av strukturer mot kavitasjonserosjon finnes det spesielle coatinger baserte på elastomerer med høy styrke og stivhet. Hvis coatingen blir utsatt for krefter fra en kollapsene kavitasjonsboble så vil elastomeren deformeres og spre kreftene over et større område. Dette gjør at spenningene kan absorberes av karbonfibrene istedenfor av plastmatrisen, som videre øker motstandsevnen mot kavitasjonserosjon betydelig. Komposittmaterialer med elastomer-coating skal ha omtrent samme motstandsevne mot kavitasjonserosjon som rustfritt stål [17]. Det finnes flere produsenter av denne type coating, og det har vært i bruk på både propeller, ror og pumper [18] [19]. Figurene under viser forskjellige strukturer beskyttet med elastomer-coating:



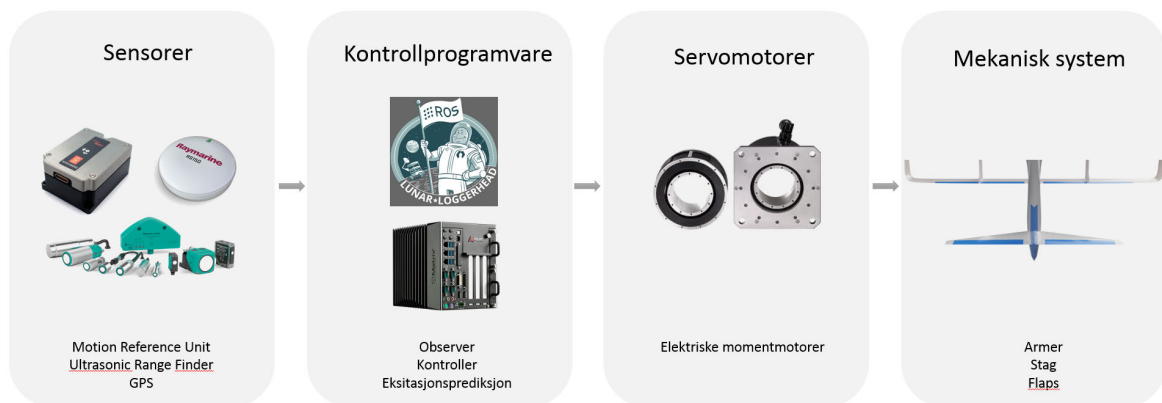
Kavitasjonserosjon er altså fullt håndterbart, men det krever at man benytter rett type beskyttelse om man skal bygge hydrofoilsystemet i kompositt. Hydrofoilsystemet fra Flying Foil AS er prosjektert med elastomer-coating som beskyttelse

KONTROLLSYSTEM OG SJØEGENSKAPER

Et vesentlig moment som skiller Flyer-fartøyene fra de fleste tidligere hydrofoilsystemer er det sofistikert automatiske flykontrollsystemet. Stabilisering fra dette systemet er avgjørende for å kunne benytte horisontale og energieffektive vinger, men systemet bidrar også sterkt til forbedring av sjøegenskaper relativt til andre fartøytyper. Ved hjelp av sensorer som måler flyhøyde, vinkler, akselerasjoner og hastighet estimerer kontrollsystemet hvordan kontrollflatene på båten bør styres for å skape en mest mulig komfortabel gange gjennom sjøen. Gjennom oppbygging og bruk av en omfattende flysimulator for hydrofoilfartøyer har konsortiet testet og justert kontrollsystemet for maksimal komfort i grov sjø, og oppnådd sjøegenskaper som så å si eliminerer sjøsyke på rutene i Trøndelag. Dette åpner for at passasjerer i større grad kan benytte båtturen til nyttig arbeid, og til at alle kan bruke båten også på dager med dårlig vær.

Kontrollsystem

Kontrollsystemet kan i grove trekk beskrives som et firedelt system. Første del er en sensorpakke som genererer sensordata om hvor fartøyet befinner seg, hvilken hastighet det har og hvilke vinkler det er rotert i. Del to er en programvare som tar sensorinput og bestemmer hvordan kontrollflatene på båten skal justeres. Neste ledd er et sett servomotorer som gjør den fysiske jobben med å påføre krefter på kontrollflater. Fjerde del av kontrollsystemet er et mekanisk system, bestående av kontrollflater under vann og mekaniske koblinger mellom disse og servomotorene. I de følgende underkapitlene gir vi en kort forklaring av hver del av kontrollsystemet.



Figur 31: Virkemåten til flykontrollsystemet

Sensorpakke

Sensorpakken består av bevegelses- og posisjonssensorer. For måling av akselerasjoner, vinkelrate og vinkler i yaw, pitch og rull, samt magnetisk orientering, benyttes MRU-enheter fra Kongsberg Maritime. Dette er industrielle og solide enheter som vanligvis brukes til blant annet dynamisk posisjonering av offshoreskip og hivkompensering av offshorekraner.



Figur 32: Kongsberg Maritime MiniMRU 30



Figur 33: Pepperl+Fuchs UC6000-30GM ultralydsensor

MRU-sensoren har ingen egen høydereferanse, og kan kun estimere vertikal posisjon basert på akselerasjonsmålinger. Uten ekstern referanse vil det være umulig å estimere vertikal posisjon uten å få oppbygging av integrasjonsfeil fra akselerasjonsmålingene. Man trenger derfor en ekstern høydereferanse. Her bruker vi ultralydbaserte avstandsmålere. Flying Foil har gjennomført tester av en slik sensorens evne til å fange opp en havoverflate også ved skrå vinkler – som ved kjøring i bølger – med stort hell. Sensorene brukes vanligvis til nivåmåling i tanker, og har en robust industriell utførelse.

Kontrollprogramvare

Alle sensordata blir sendt til industrielle datamaskiner som kjører Flying Foils egenutviklede flykontrollprogramvare. Dette er en omfattende programvarepakke med mange komponenter, og vi skal bare gi en overordnet forklaring av denne her.

I korte trekk består flykontrollprogramvaren av to hovedelementer:

- 1 Observasjon av fartøyets posisjon og vinkler
- 2 Kontrollalgoritmer

Første hovedkomponent er en såkalt «observer». Denne behandler og kombinerer sensordata, og estimerer parametre som trengs for å kjøre kontrollalgoritmene og sikkerhetsfunksjoner. En fysisk tolkning av observerens arbeid er at den gjennomfører det resonneringsarbeidet som en pilot gjør når han ved manuell flyvning leser av alle tilgjengelige sensorer, og gjør seg opp et totalbilde av hvor flyet er og hvordan det er rotert i forhold til bakken. Parametrene som blir estimert fra observeren er tredimensjonal posisjon, hastighet, akselerasjon og alle vinkler på fartøyet. Observeren er bygget opp rundt et Kalmanfilter. Dette er et velprøvd observerdesign, og nærmest en industriell standard for hvordan denne type kode blir bygget opp. Kalmanfilteret er mellom annet utbredt i flyindustrien. Den andre hoveddelen av kontrollprogramvaren er selve kontrolleren, en programvarepakke som kjører kontrollalgoritmer. I enkle trekk kan denne beskrives som et sett beregninger som avgjør hvordan styreflatene på fartøyet bør justeres for å få en mest mulig kontrollert fartøybevegelse fra nåværende posisjoner og vinkler til ønskede posisjoner og vinkler. En fysisk tolkning av kontrolleren kan man igjen få ved å sammenligne programvarens arbeid med arbeidet til en pilot ved manuell flyvning. Kontrolleren gjennomfører den resonneringsprosessen som trengs for å vurdere hvordan man bør bevege styreflatene – via kontrollstikka i piloteksempelet – for å styre fartøyet til ønsket flyhøyde og ønskede vinkler i forhold til bakken.

ROS

Hele kontrollprogramvaren er skrevet i et programvarerammeverk kalt Robot Operating System (ROS). Dette rammeverket gir mange fordeler, blant annet en svært oversiktlig programvarestruktur, enkel integrasjon mot nye sensorer og aktuatorer og en programvarestruktur som gjør det effektivt å utvide programvarepakken i fremtiden. ROS brukes i mange robotapplikasjoner, og støttes av blant annet ABB og Motoman sine industrielle roboter. Oppbygging av programvarepakken rundt et anerkjent rammeverk gir et vesentlig høyere nivå av sikkerhet enn dersom man skulle startet fra bunnen av og skrevet alle deler av koden som skreddersøm for Flyer-fartøyene.

Servomotorer

Kontrollsignaler fra kontrollprogramvaren sendes til sju servomotorer – en per styreflate. Dette er momentsterke elektromotorer som fysisk vrir det mekaniske systemet som beveger styreflatene. Motorene har sin egen interne kontrollalgoritme som beveger kontrollflatene raskest mulig til ønsket posisjon.



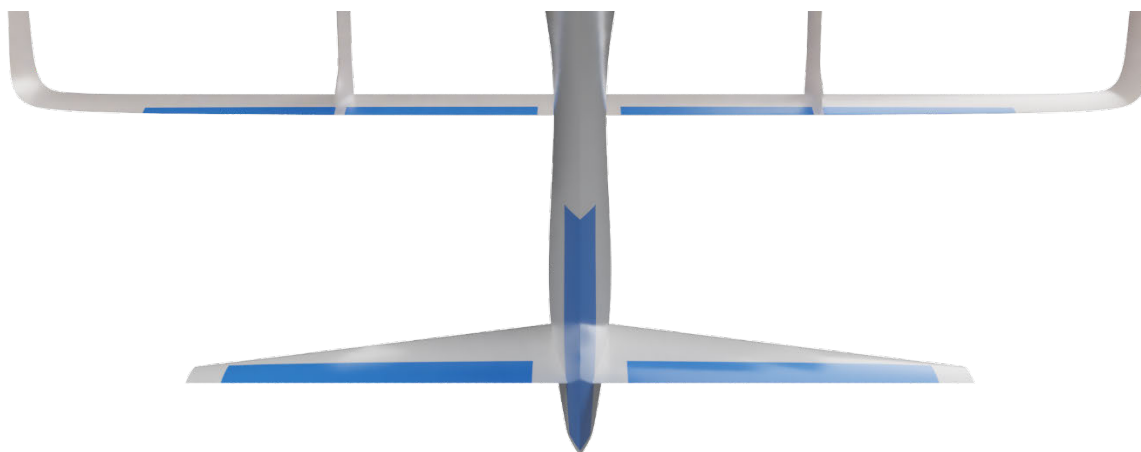
Figur 34: Bosch Synchronous Torque Motor

Ved å velge elektriske momentmotorer heller enn et hydraulisk servosystem oppnår man en rekke fordeler. Det mekaniske systemet blir vesentlig mindre komplekst og dermed mer robust. I tillegg eliminerer man støy fra hydraulikkpumper, og reduserer vedlikeholdsbehovet for servosystemet. Momentmotorene består av én bevegelig del – rotoren i senter av motoren – og krever så å si ikke noe vedlikehold.

Alle servomotorer er plassert lett tilgjengelig inne i fartøyet, i ulike rom under passasjerdekk. De vil være tilgjengelige gjennom luker og fra store rom nede i skrogene, og vil dermed enkelt kunne inspiseres eller skiftes ut ved eventuelle feil.

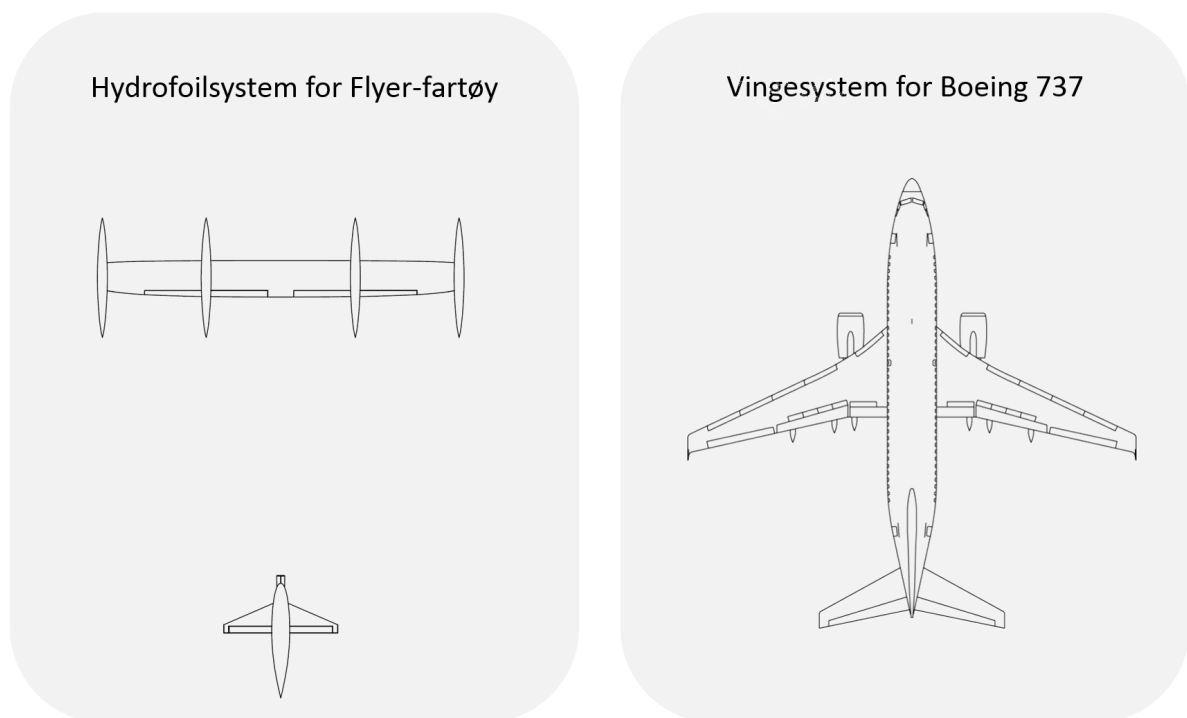
Mekanisk system

Siste ledd i kontrollsystemet er det mekaniske systemet, med styreflater og forbindelse mellom disse og servomotorene. Vi skal ikke presentere alle deler av dette systemet i nåværende rapport, og velger å fokusere på hovedtrekkene i hvordan det fungerer.



Figur 35: Styreflater på Flyer-fartøyene

Den synlige delen av det mekaniske systemet er et sett styreflater, som vist på Figur 35. Styreflatene ligner på de man finner på en flyvinge, der sistnevnte ofte omtales som «flaps». Ved å rotere styreflatene om en akse i fremre del, endrer man i praksis krumningen på vingen, og får mer eller mindre løftekraft. Flyer-fartøyene har styreflater på styrbord og babord side av hovedvingen, på halevingen og på den vertikale støtten til halevingen. Ved å justere alle styreflater på hovedvingen parallelt kan man endre totalløftet på båten, og dermed justere flyhøyden. Ved å justere styrbord og babord styreflater motsatt av hverandre kan man påføre et rullmoment, og dermed styre krengevinkelen. Styreflatene på halen brukes til å påføre vertikale krefter oppover eller nedover på hekken på båten, og brukes dermed for å justere pitchvinkelen. Siste styreflate er den som er plassert på den vertikale støtten til halen. Ved justering av denne påfører man krefter sideveis på halestøtten, og den brukes dermed til å justere kursen på båten – på samme måte som et konvensjonelt ror. På samme måte som generell vingekonfigurasjon er oppsettet av styreflater helt tilsvarende det man finner på fly. Likheten er illustrert i Figur 35, der man ser hydrofoilsystemet ovenfra, ved siden av en illustrasjon av et Boeing 737-fly sett ovenfra. På flyet har man også styreflater ytterst på hovedvingen, på halen og på det vertikale haleroret. Man har nøyaktig samme mulighet for påføring av kontrollkrefter i Flyer-fartøyene som i det velprøvde styreflatedesignet som brukes i flyindustrien.



Figur 36: Hydrofoilsystem for Flyer-fartøy og vingesystem for fly, sett ovenfra.

Nøkkelen til å kunne bruke momentmotorer heller enn et hydraulisk servosystem for å justere styreflatene ligger i å lage et mekanisk system der servomotorene kan plasseres over vann. En momentmotor med tilstrekkelig kraft for styring av en styreflate på Flyer 30-fartøyet har en diameter på omtrent 50 cm. Den kan ikke plasseres under vann uten å føre med seg en stor innkapsling, som igjen ville økt motstanden på fartøyet betydelig. Flying Foil har designet et mekanisk system som tillater plassering av servomotorene inne i fartøyet skrog, like under hoveddekk. Med dette systemet kan alle komponenter under vann være slanke og strømlinjeformede, og man oppnår minimal motstand. I tillegg fører systemet til at alle servomotorer er tilgjengelige for inspeksjon, utskifting og vedlikehold uten at man behøver å løfte fartøyet på land. Dette i motsetning til tidligere aktivt styrte hydrofoilsystemer, der de hydrauliske servoene var plassert inne i hydrofoilsystemet under vann.

Det mekaniske systemet består i enkle trekk av et sett armer, stag og glidelagre. Et minimum av bevegelige deler er plassert under vann, og alle slidedeler i undervannsdelen av systemet har tilstrekkelig levetid til å bare måtte utskiftes ved normale periodiske dokkinger av fartøyet for inspeksjon av skrog og fremdriftssystem.

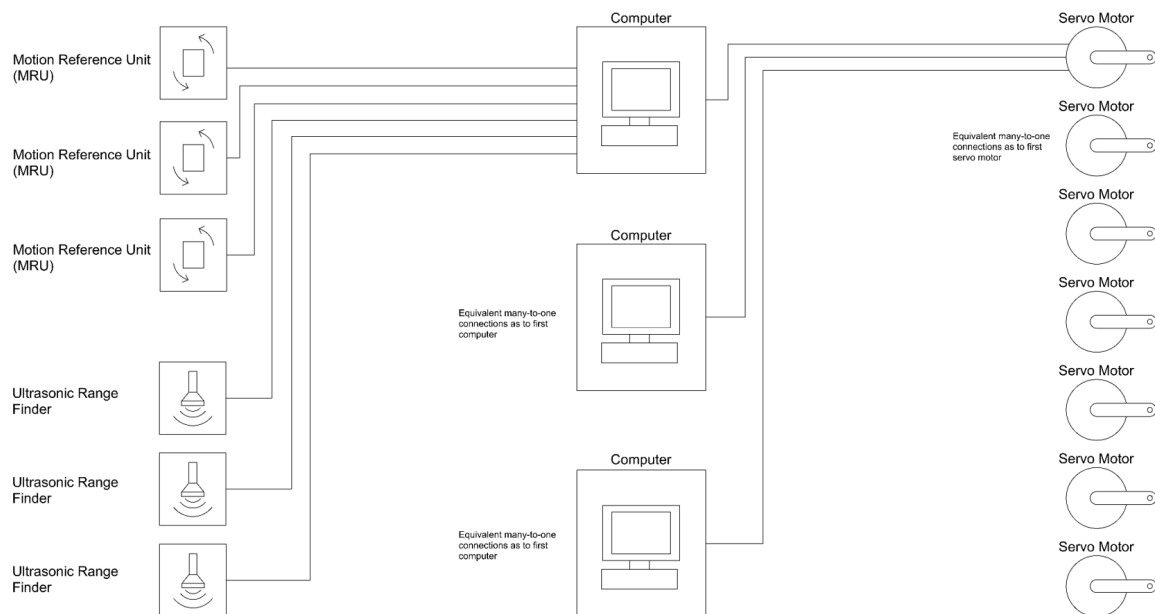
Redundans og sikkerhet

Siden kontrollsystemet har mulighet for å påføre store krefter på fartøyet er det essensielt at dette er redundant og sikkert. En av konklusjonene fra dette er at flykontrollsystemet må designes med et slikt sikkerhetsnivå at det vil tåle alle tenkelige enkeltfeil som kan oppstå, uten at dette fører til en farlig situasjon for passasjerer eller mannskap. Enkeltfeil kan for eksempel være feil på datamaskiner, sensorer, kabler, servomotorer eller mekaniske koblinger. Samme hva det er som feiler så skal dette ikke føre til en farlig situasjon. Dette er en lignende designfilosofi som det som blir brukt ved design av automatiske posisjoneringssystemer for offshorefartøyer.

For å møte kravet om å tåle alle tenkelige enkeltfeil er kontrollsystemet designet med dobbel redundans i sensor- og datamaskinhardware. På sensorsiden har man tre identiske enheter av hver sensortype. Signalene fra disse blir sammenlignet i kontrollprogramvaren. Dersom det er signifikant

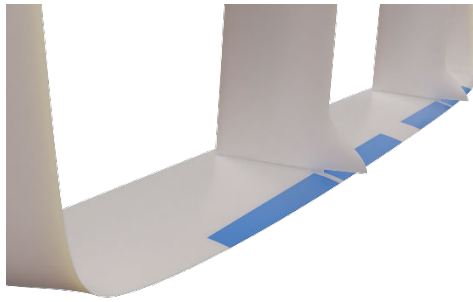
avvik mellom de tre sensorene over flere påfølgende målinger blir den mest avvikende sensoren stemplet som ødelagt, og kontrollsystemet benytter et gjennomsnitt av de to gjenværende sensorene som sin input. Et signal om nødlanding av fartøyet blir så sendt. Dette kutter fremdriftskraften og starter en rask kontrollert landing på skrogene.

Tilsvarende benyttes tre kontrolldatamaskiner med samme kontrollprogramvare. Alle de tre datamaskinene er koblet til hver servomotor, og lokalt på servomotoren blir signalene sammenlignet etter en tilsvarende metodikk som beskrevet for sensordataene. Ved avvik blir igjen et signal om nødlanding sendt.

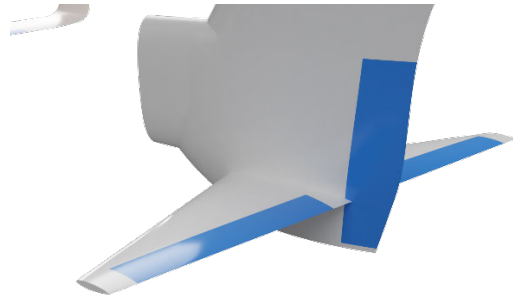


Figur 37: Illustrasjon av redundansfilosofi i flykontrollsystem

For servomotorene og det mekaniske systemet benyttes en litt annen sikkerhetstaktikk. Dobling eller tredobling av antall servomotorer per styreflate, eventuelt dobling av mekanisk aktiveringssystem, ville ikke vært tilstrekkelig for å tilfredsstille kravet om å kunne tåle alle typer enkeltfeil uten å miste kontrollen på båten. Dette fordi man fortsatt ville kunne tenke seg en situasjon der man mister en av styreflatene på vingen– og dermed mister muligheten til å påføre kontrollkrefter i en av frihetsgradene. For å sikre mot alle typer enkeltfeil har vi valgt å designe fartøyet med dobbelt sett av alle sikkerhetskritiske styreflater. Det gjelder styreflatene for flyhøyde, rullvinkel og pitchvinkel. Figur 38 viser hvordan dette ser ut på hovedvingen. Her er det fire styreflater, to på babord side og to på styrbord side. De to flatene på hver side utgjør et par som styres helt likt ved normal flyvning. De har imidlertid helt uavhengig mekanisk system og uavhengige servomotorer. Dersom en styreflate av en eller annen grunn feiler eller faller av, har man fortsatt en annen styreflate med samme funksjon, som kan styre fartøyet gjennom den korte tiden det tar å nødlande båten.



Figur 38: Kontrollflater på hovedvinge

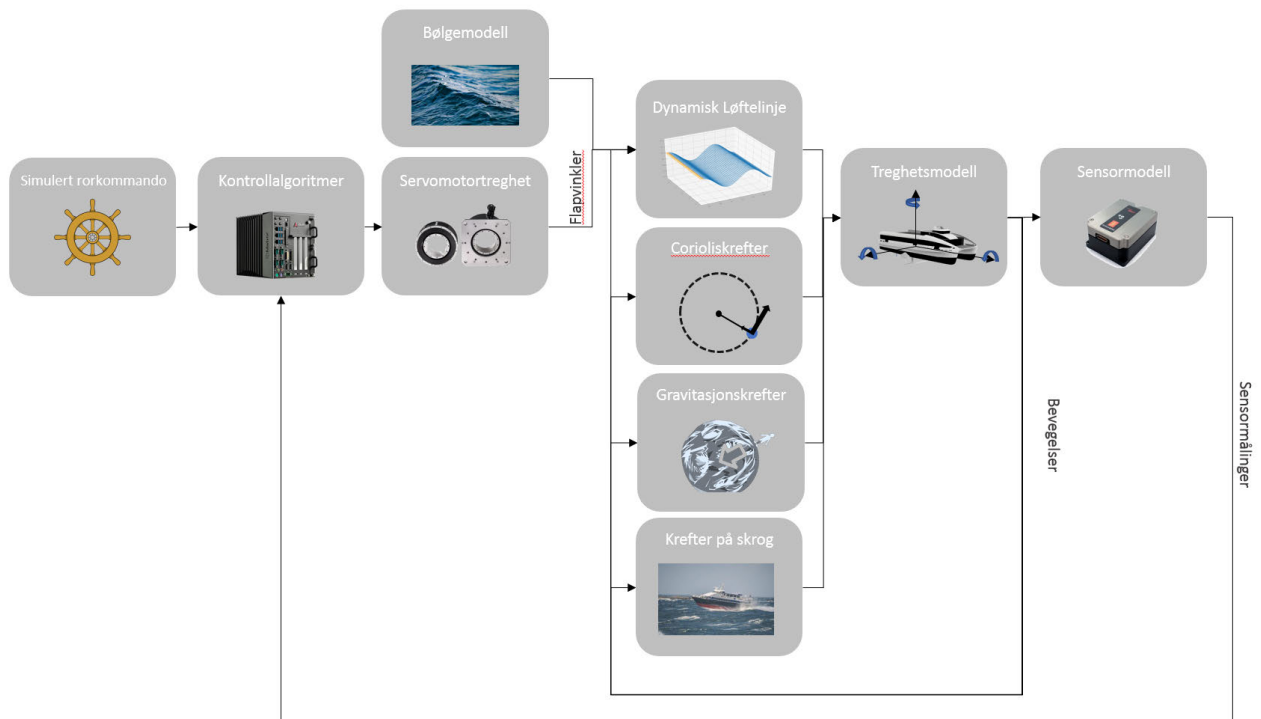


Figur 39: Kontrollflater på hale

Figur 39 viser et tilsvarende oppsett på halen. Den horisontale styreflaten er delt i to uavhengige deler, der begge har uavhengig mekanisk aktueringssystem og uavhengige servomotorer. Roret er ikke delt i to uavhengige styreflater, da vi ikke ser på dette som kritisk for flysikkerhet. Det redundante designet av kontrollflater sikrer trygg nødlanding ved alle enkeltfeil på servomotorer, mekanisk system eller kontrollflater.

Flysimulator

Ved design av Flying Foils hydrofoilsystem og tilhørende kontrollflate er det essensielt å ha god kontroll på hvordan fartøyet vil oppføre seg ved alle faser av dets operasjon – ved stabil flyvning og ved avansert manøvrering, i stille vann og i grov sjø. Med gode prediksjoner av fartøyet oppførsel kan man designe vingsystemet for best mulig flystabilitet, og tilsvarende teste og justere flykontrollsystemet gjennom et stort antall designiterasjoner før man bygger den første båten. Konsortiet har derfor valgt å legge stor vekt på utvikling av en detaljert flysimulator for hydrofoilsfartøyer.



Figur 40: Virkemåte for flysimulator

Krefter

Kjernen av flysimulatoren er en hydrodynamisk simuleringsmodul basert på ulineær Dynamisk Løftelinje (Dynamic Lifting Line, heretter omtalt som DLL). Denne tar hensyn til løftvariasjoner langs vingens spenn, hystereseeffekter og tilhørende tidsforsinkelser for krefter fra kontrollflater, effekter fra vingens påvirkning på vannoverflaten, varierende innstrømningsretning langs vingen i irregulær sjø og variasjoner i motstand på grunn av bølger og defleksjon av kontrollflater. Simuleringsmodulen har vært testet mot høyoppløselige CFD-simuleringer, med godt samsvar i predikerte hydrodynamiske krefter. Resultater fra denne type testing – der man fant et samsvar innenfor 9% i gjennomsnittsmotstand og 2 % i løftvariasjoner, kan finnes i [20].

I tillegg til hydrodynamiske krefter på vingesystemet blir også krefter på skroget estimert.

Oppdriftskrefter og skrogmotstand påvirker fartøyet ved kraftige svinger, og bidrar henholdsvis til å redusere rullvinkler og å øke svingmomentet ved «subbing» av ett og ett skrog i vannet.

Ved siden av hydrodynamiske krefter blir også gravitasjonskrefter og treghetskrefter beregnet og lagt til i den endelige kraftsummeringen.

Bevegelser

I flysimulatoren er fartøyet fritt bevegelig i alle seks frihetsgrader, og kan dermed flyttes og roteres i alle retninger. Etter å ha summert alle krefter fra alle ovenfornevnte moduler blir disse kombinert med en massetreghtsmodell av fartøyet og instantan akselerasjon blir beregnet. Denne blir så brukt til å beregne bevegelsen i inneværende tidssteg og dermed ny posisjon for neste simuleringssteg.

Kontroller

Et viktig element ved flysimulatoren er evnen til å inkludere flykontrollsystemet i selve simuleringssløyfen. En egen modul er utviklet, der man kan emulere signaler fra alle sensorer, kjøre kontrollprogramvaren og emulere treghet i selve aktueringssystemet. For hvert tidssteg i simulatoren oppdateres kontrollsystemets kommandoer, og posisjonen på alle styreflater blir oppdatert før man kjører neste beregning av krefter på hydrofoilsystemet. En fullstendig oversikt over virkemåten til flysimulatoren og koblingene mellom de ulike modulene kan ses i Figur 40.

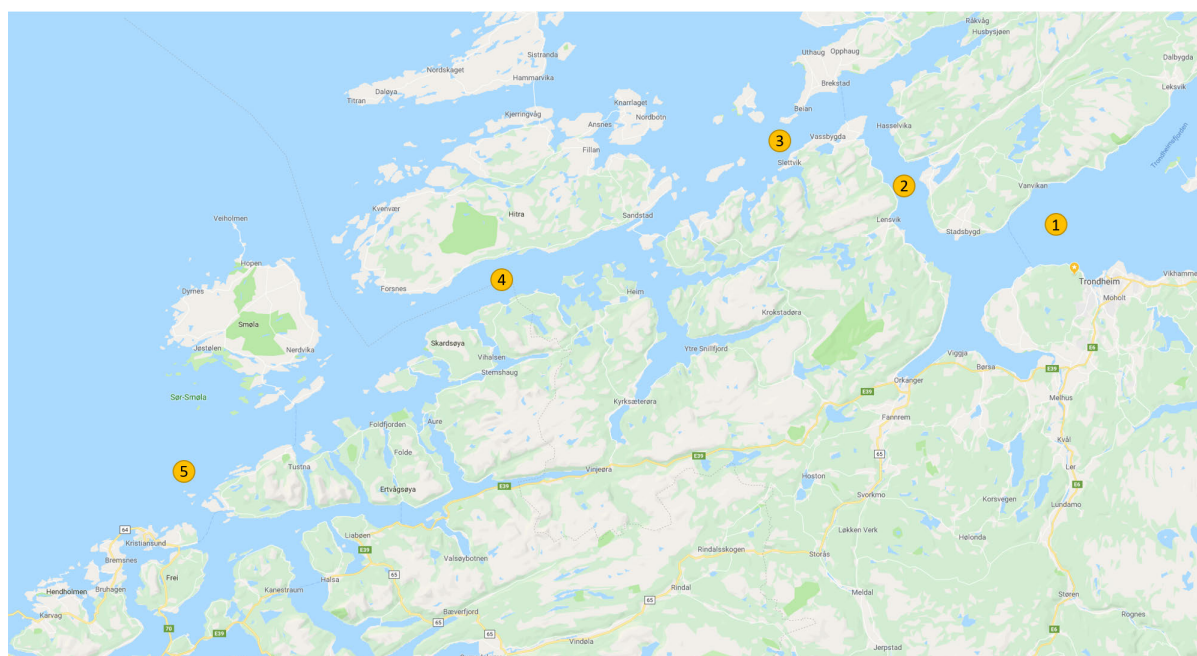
Ved å inkludere kontrollsystemet i simuleringen har man mulighet til å teste ulike algoritmer og innstillinger av dette. Kontrollsystemet har avgjørende effekt på både passasjerkomfort og energibehov ved kjøring i bølger, og et omfattende arbeid har blitt gjort for å sørge for et mest mulig fornuftig kompromiss mellom disse to egenskapene.

Ved siden av å benyttes for optimalisering av kontrollsystemet har simulatoren blitt brukt for å estimere nødvendige kontrollflateutslag og hastighet på servomotorer. Dette er nøkkeltall som er viktige for dimensjonering av servosystemet, som igjen påvirker kostnaden på fartøyet vesentlig. Simulatoren kan også brukes i fremtidig arbeid med testing og evaluering av fartøyets oppførsel i ulike nødsituasjoner, f.eks. ved skader på foilsystemet, utfall av servomotorer eller lignende. Dette er et omfattende arbeid som ikke kan inkluderes innenfor det relativt begrensede oppdraget dokumentert i nåværende rapport.

Sjøegenskaper

Sjøegenskaper har blitt simulert gjennom en todelt prosess. Første trinn er å bestemme såkalte Response Amplitude Operator-kurver for de designede fartøyene. I enkle trekk kan man forklare dette som datakurver som gir fartøyets respons per enhet bølgehøyde for ulike bølgeretninger og -frekvenser. Dette er gjennomført for 9 bølgeretninger og 40 bølgefrequenser, og interpoleringsmodeller har blitt satt opp for å bestemme fartøyenes oppførsel mellom disse datapunktene.

Steg to har vært å finne representative sjøtilstander for hurtigbåtrutene i Trøndelag. I denne prosessen har vi valgt å hente data fra European Center for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF) [21]. ECMWF er et forskningsinstitutt som simulerer globale værmodeller og som blant annet brukes av Meteorologisk Institutt som input i deres nasjonale værmodeller. Såkalte «hindcast»-data – historiske data – finnes for fire måletidspunkter per døgn fra Januar 1979 til i dag. For å skaffe et statistisk signifikant datagrunnlag har vi hentet ut alle fire måletidspunkter for hver dag i perioden 1.07.2018 til 01.07.2019, til sammen 1460 måletidspunkter. Værdataene fra ECMWF gir ikke sjøtilstand direkte, men de gir vindstyrke og -retning. Vi har derfor kombinert disse dataene med kartoppmålinger av «fetch distance», distanse fra nærmeste oppvinds land, til et sett representative punkter langs hver rute. Disse evalueringspunktene er vist i Figur 41. På Trondheim-Vanvikan-ruta benyttes bare evalueringspunkt 1, på Trondheim-Brekstad benyttes punkt 1 og 2, og på Trondheim-Kristiansund benyttes alle punktene. Sammen med vindstyrke har vi dermed tilstrekkelig informasjon for å kunne beregne et såkalt bølgespekter gjennom f.eks. JONSWAP (Joint North Sea Wave Project)-modellen. Et bølgespekter inneholder informasjon om bølgeenergimengde for ulike bølgefrequenser, som er det man trenger for å simulere en realistisk sjøtilstand. Ved å kombinere RAO-data for fartøyene med bølgespekter for de ulike sjøtilstandene har vi beregnet hvert fartøys bevegelser for et års operasjon.



Figur 41: Evalueringspunkter for vind og bølger

For å gi dataene mer mening har vi valgt å gjennomføre tilsvarende beregningsoperasjon for konvensjonelle katamaraner, som gjerne er alternativet til Flyer-fartøyene. Hoveddimensjonene på fartøyene som er brukt i studiet av sjøegenskaper er gitt i Tabell 1.

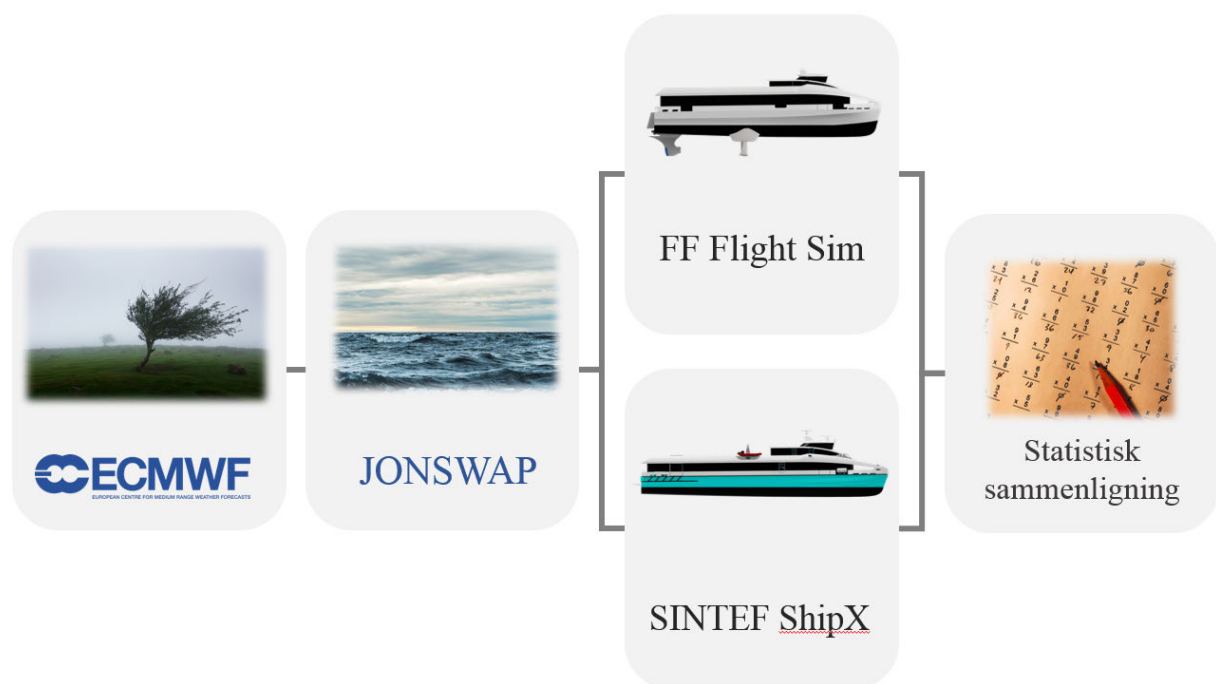
Tabell 1: Hoveddimensjoner og hastighet for fartøyene i sjøgangssimuleringer

Rute	Fartøytype	Lengde [m]	Bredde [m]	Vekt [tonn]	Hastighet [knop]
Trd-Krs og Trd-Brk	Flyer 30	30	12.6	130	40
	40m	40	10	147	33
	katamaran				
Trd-Van	Flyer 20	20	8.5	66	35
	27m	27	8.5	75	25
	katamaran				

De konvensjonelle katamaranene i studiet har en moderne skrogform tilsvarende den man finner på hurtigbåtene som trafikkerer ruta mellom Trondheim og Kristiansund i dag. Vekten er høyere enn for dagens hurtigbåter, i tråd med at båtene vil bli tyngre i forbindelse med installasjon av nullutslipps drivlinje. Vi har valgt å øke vekten på de konvensjonelle katamaranene relativt til beregnede vektresultater for Flyer-fartøyene. Årsaken til dette er at en konvensjonell båt med høyere motstand vil trenge et tyngre kraftforsyningssystem enn en mer effektiv hydrofoilbåt. Økt vekt vil typisk bidra til å forbedre sjøegenskapene, og vi ønsker å være sikre på at vi ikke sammenligner Flyer-fartøyene med et dårligere referansepunkt enn hva som er realistisk.

For de konvensjonelle katamaranene er RAO-kurver beregnet ved hjelp av programvaren ShipX, utviklet av SINTEF Ocean. Ved å kombinere disse med de ovenfornevnte værdedataene har vi fått et omfattende statistikkgrunnlag for sammenligning mellom konvensjonell fartøyteknologi og de nydesignede fartøyene.

Simulerings- og sammenligningsprosessen for sjøegenskaper oppsummeres kort i Figur 42. Vinndata fra ECMWF brukes sammen med geografiske data om distanse fra land til å generere bølgedata basert på JONSWAP-modellen. Disse dataene kombineres med simuleringsdata fra flysimulatoren og simuleringsprogramvaren ShipX. Dette gjøres for fire tidspunkter per døgn over en 12-måneders periode. Til slutt sammenlignes statistikk fra resultatene.



Figur 42: Prosessen bak sammenligningsstudiet for sjøegenskaper i utviklingskontrakten

Resultater

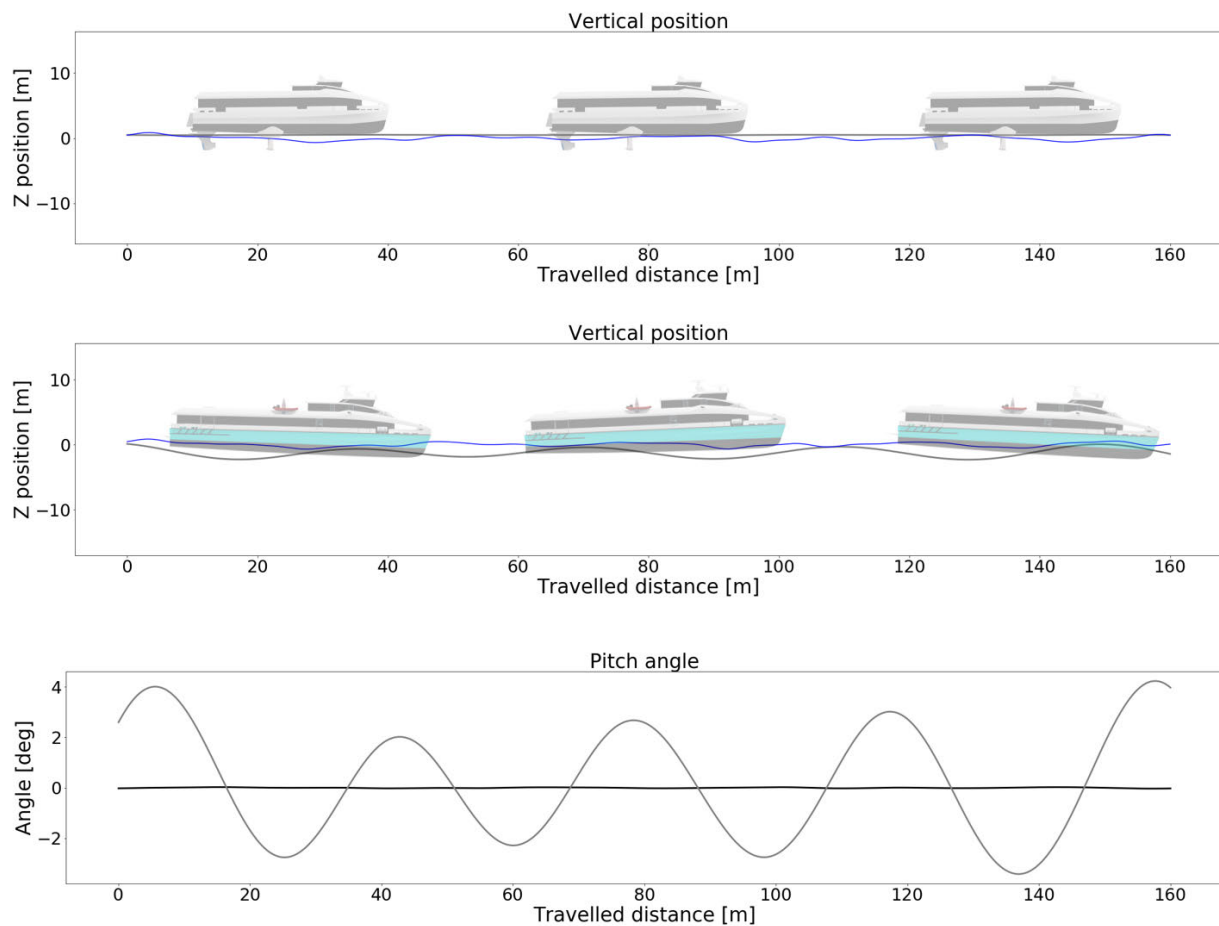
Beregningsprosessen for sjøegenskaper gir et omfattende datasett for bevegelser og akselerasjoner for de to fartøystypene gjennom lang tids operasjon. Man kunne skrevet en egen rapport bare med resultater fra dette, og i nåværende presentasjon må vi holde dette kort. Vi velger å fokusere på resultater som vi tror kan være lett forståelige, og som gir et inntrykk av den opplevde passasjerkomforten om bord. De av leserne som ønsker mer informasjon ut over det vi presenterer her er velkomne til å ta kontakt med Flying Foil.

Grafisk fremstilling av bevegelser

Simuleringsresultatene viser at det er svært stor forskjell på komfortnivået som vil oppleves i Flyer 20/Flyer 30-fartøyene, sammenlignet med konvensjonelle katamaraner. Denne forskjellen kan kvantifiseres på mange ulike måter, men vi finner det aller mest fornuftig å starte presentasjonen av denne med å vise den fysiske forskjellen på bevegelsesmønsteret til et fartøy av konvensjonell type mot et av den nye typen.

Figur 43 viser en sammenligning av bevegelsesmønsteret til Flyer 30 og en konvensjonell 40-meters katamaran, i en grov sjøtilstand. Flyer 30 går med 40 knop og den konvensjonelle katamaranen går med 33 knop. Signifikant bølgehøyde er 1.75 meter, og fartøyene har sjøen inn skrått forfra, 60 grader målt fra fartøyets kurs. Det er ikke sikkert at noen av fartøyene faktisk ville gått med full marsjhastighet i en såpass grov sjøtilstand, men simuleringen viser hva som ville vært tilfelle om de gjorde det. Øverste plott viser vannflaten som blå strek og Flyer 30 sin vertikale posisjon som grå strek. I tillegg er fartøyet tegnet inn på tre ulike posisjoner langs tidsserien. Midterste plott viser tilsvarende verdier for den konvensjonelle 40-meters katamaranen. Nederste plott viser pitchvinkler – eller stampevinkler – til Flyer 30 og den konvensjonelle katamaranen. Alle tegninger av fartøyene i plottene er posisjonert og rotert i henhold til simuleringsresultatene.

Resultatene i Figur 43 viser tydelig at det er en vesentlig forskjell på oppførselen til et Flyer-fartøy og en konvensjonell katamaran i grov sjø. Grunnprinsippet som ligger bak denne forskjellen kan forklares veldig enkelt: Flyer 30 er i all hovedsak over bølgene, mens hydrofoilsystemet er under bølgene. På grunn av vertikale vannhastigheter under bølgene vil også dette fartøyet løftes litt opp og ned, men det aktive kontrollsystemet jobber hele tiden med å motvirke denne type bevegelser. Den konvensjonelle katamaranen må derimot pløye seg gjennom bølgene, og vil få store variasjoner i vertikale krefter på skroget. Den har ikke noen form for aktiv styring av vertikale krefter, og reagerer dermed med å bevege seg opp og ned, samt å få store rotasjoner i stampe.



Figur 43: Sammenligning av bevegelser for Flyer 30 og en konvensjonell 40-meters katamaran. $H_s = 1.75$ m, bølgeretning 40 grader skrått mot baugen. Hastighet Flyer 30: 40 knop. Hastighet 40-meters katamaran: 33 knop. Øverste plott viser vannflaten i blått og vertikalposisjon til undersiden av Flyer 30-skroget like under tyngdepunktet. Midterste plott viser tilsvarende verdier for en konvensjonell 40-meters katamaran. Bølgemønstrene blir litt forskjellige mot siste halvdel av plottet, siden forskjellig hastighet fører til at båtene når samme posisjoner på litt ulike tidspunkter. Nederste plott viser pitchvinkler/stampevinkler for de to fartøyene.

Kvantitativ forskjell

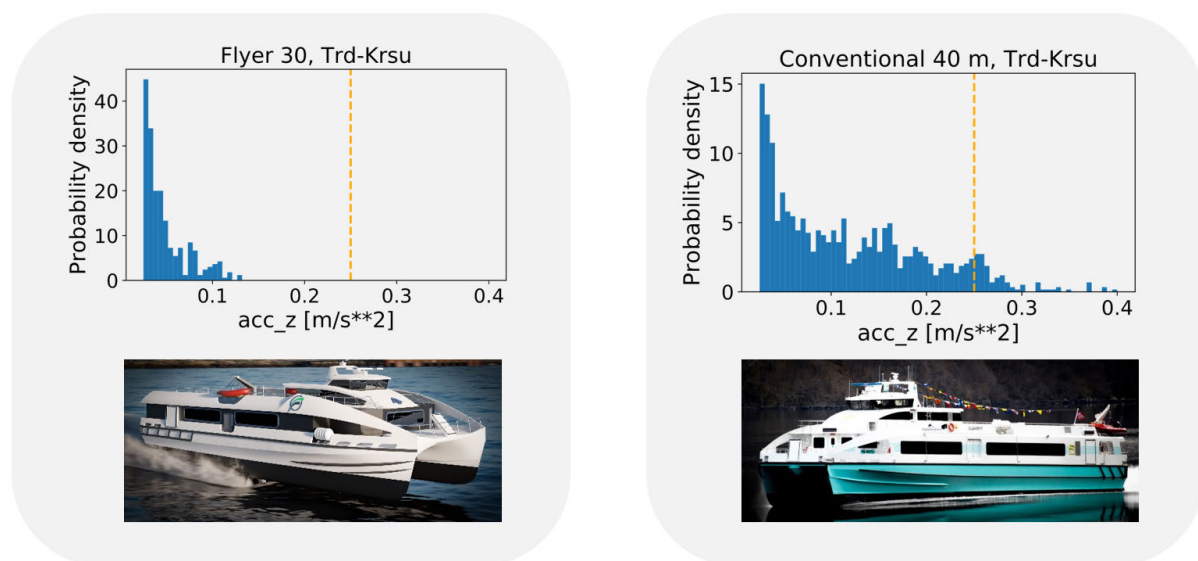
Illustrasjoner kan gi et godt førsteinntrykk av hva som skjer. Likevel er det de harde tallene fra statistisk sammenligning mellom konvensjonell fartøYTEknologi og de nye fartøyene som er det aller mest interessante i nåværende sjøgangssimuleringer. Vi har derfor hentet ut statistiske data fra simuleringsresultater fra 12 måneders operasjon. Det som i hovedsak begrenser komforten i et passasjerfartøy er akselerasjoner. Enkelt forklart er akselerasjoner de bevegelsene man kjenner hvis man lukker øynene om bord et fartøy. Det er akselerasjoner som gjør at det kan kile i magen, det er disse som gjør passasjerene sjøsyke, og akselerasjoner er også det som gjør at det kan være utfordrende å stå oppreist eller å gå uten å holde seg fast. I de følgende delkapitlene velger vi derfor å fokusere på å vise akselerasjonsresultater, og på å oversette disse til ulike mål for passasjerkomfort.

Sannsynlighet for ubehagelige akselerasjoner



Figur 44 viser histogrammer for fartøyakselerasjoner for Flyer 30-fartøyet og for en konvensjonell 40-meters katamaran med samme vekt. Et histogram viser søyler med «sannsynlighetstetthet» for ulike verdier. Enkelt forklart viser høyden på hver søyle hvor sannsynlig det er at et simuleringsresultat i datasettet faller innenfor intervallet fra venstre til høyre ende av søylen. Høye søyler antyder at mange av simuleringsresultatene har havnet i denne søylas intervall, mens lave søyler indikerer at få resultater ligger i dette intervallet. Langs x-aksen ser vi vertikale akselerasjoner målt i passasjersalongen like over tyngdepunktet, og langs y-aksen ser vi sannsynlighetstettheten til akselerasjonsverdiene. Begge histogrammer viser resultater fra 12 måneder operasjon på ruta mellom Trondheim og Kristiansund, og viser et utvalg av resultater mellom 0.025 m/s^2 og 0.40 m/s^2 . Årsaken til at intervallet ikke går til 0 m/s^2 er at svært mange simuleringsresultater kommer fra dager med helt stille vær, og at de høye sannsynlighetene for nesten identiske bevegelser som er tilnærmet lik null overskygger den interessante delen av plottet dersom man starter fra 0 m/s^2 . Forskjellen på de to histogrammene er bemerkelsesverdig! Det er tydelig at passasjerene i Flyer 30 i all hovedsak vil oppleve akselerasjoner i venstre ende av akselerasjonsspennet som er plottet, nesten utelukkende verdier under 0.12 m/s^2 . Passasjerer i den konvensjonelle katamaranen vil derimot oppleve et langt bredere spekter av akselerasjoner, ofte opp 0.30 m/s^2 .

Akselerasjoner målt i 0.30 m/s^2 kan være vanskelige å forholde seg til, og vi må derfor sette disse tallene i en sammenheng for at de skal gi mening. Nordforsk har publisert akselerasjonsgrenser for passasjerfartøyer, med verdier som angir grensen for når transittpassasjerer opplever ubehag, og for når passasjerer ikke lenger er i stand til å utføre såkalt «intellektuelt arbeid» [22]. Disse grensene er på henholdsvis $0.05g$ og $0.10g$, eller ca 0.49 m/s^2 og 0.98 m/s^2 . Plottene i Figur 45 viser rms-verdier av akselerasjoner, altså ikke maksimale akselerasjoner. Siden fartøyene er simulert i kaotiske og realistiske sjøtilstander heller enn bølger av konstant høyde og frekvens, må man igjen ty til statistiske grep for å finne en representativ grense for når passasjerer vil oppleve ubehag i henhold til Nordforsk sine grenser. Vi antar at dette inntreffer når man opplever akselerasjoner over grenseverdien minimum 5% av tiden. Kombinert med en antakelse om normalfordelte akselerasjoner, og at positive og negative akselerasjoner oppleves som like ubehagelige, gir dette grenseverdier for rms på henholdsvis 0.25 m/s^2 og 0.50 m/s^2 . Den laveste av disse grenseverdiene er tegnet inn på Figur 46.



Figur 44: Vertikale akselerasjoner, vist som sannsynlighetsfordeling for RMS-verdi av forskjellig styrke. Flyer 30 til venstre og en konvensjonell 40-meters katamaran med samme vekt til høyre. Oransje linje indikerer komfortgrense for passasjerfartøyer.

Antall tilfeller med fartstap av hensyn til passasjerkomfort

På ruta mellom Trondheim og Kristiansund har man 1872 hurtigbåtav ganger per år. Om man tar hele datasettet med sjøgangssimuleringer og teller opp antall turer der man overskrider en av de to komfortgrensene, får man at en konvensjonell katamaran uten fartsreduksjon overskrider komfortgrensen for passasjerfartøyer på 186 turer, og at den overskrider den strengere grensen der passasjerer ikke er i stand til å utføre «intellektuelt arbeid» på 104 turer. Dette utgjør henholdsvis 9.9% og 5.5% av turene. Reelt sett vil man måtte anta at båten må redusere hastigheten eller velge en alternativ rute på mange av disse turene, noe som vil føre til forsinkelser. I datasettet for simuleringer av Flyer 30 på samme rute i samme værforhold overskrides aldri noen av de to komfortgrensene. Dette til tross for en vesentlig høyere hastighet på 40 knop. Det forventes altså ikke at man på noe tidspunkt vil måtte redusere hastighet på grunn av ubehag for passasjerene.

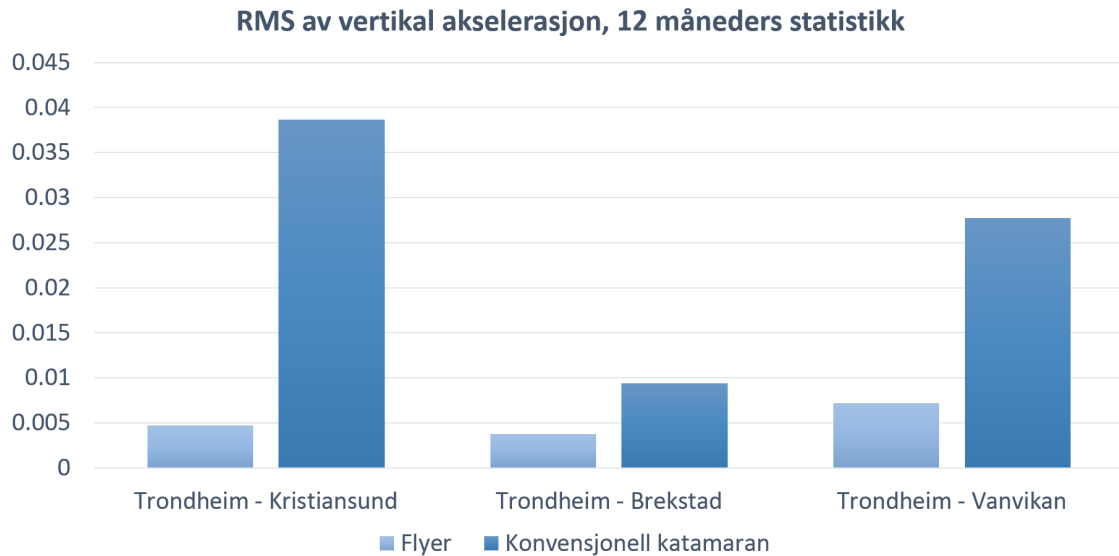
Gjennomsnittlige akselerasjoner

En annen, og svært enkel, fremstilling av forskjellen på de to fartøyene kan man se i Figur 45. Her har vi plottet gjennomsnittet av RMS-verdiene for akselerasjoner for alle datapunkter på alle simuleringstidspunkt over et år. Akselerasjonene er målt midtskips like over tyngdepunktet på hver båt. Akselerasjonsverdier kan som nevnt ses på som et mål på hvor ubehagelig en reise føles – og er i stor grad det man subjektivt opplever som bevegelsene til fartøyet.

Tallene i Figur 45 viser at det er svært stor forskjell på Flyer-fartøyene og konvensjonelle katamaraner. Den aller største forskjellen finner vi på den mest værutsatte ruta mellom Trondheim og Kristiansund. Her viser simuleringresultatene at man i gjennomsnitt vil oppleve 88 % lavere akselerasjonsverdier i hydrofoilfartøyet enn i en konvensjonell katamaran!

På Trondheim-Brekstad-ruta vil både den konvensjonelle katamaranen og hydrofoilfartøyet ha vesentlig lavere akselerasjonsverdier. Dette henger sammen med at ruta går i mer skjermede farvann inne Trondheimsfjorden, og har trolig også sterk sammenheng med at man nesten utelukkende kjører parallelt med fjorden. Dette fører til at man i all hovedsak har bølgene enten direkte forfra eller direkte bakfra, noe som typisk forbedrer komforten i en hurtigbåt med skjærende skrog eller hydrofoiler relativt til å ha de i en skrå vinkel. Til tross for lavere verdier for begge fartøyer er forskjellen vesentlig, med 60% lavere akselerasjoner i Flyer-båten enn i den konvensjonelle katamaranen.

På ruta mellom Trondheim og Vanvikan er akselerasjonsverdiene høyere enn for Trondheim-Brekstad. Dette er naturlig, siden man her sammenligner to mindre fartøyer, og siden man også simulerer bevegelsene på en rute som går på tvers av Trondheimsfjorden heller enn langs den. Forskjellen på akselerasjonene i de to båtene er hele 74 %.

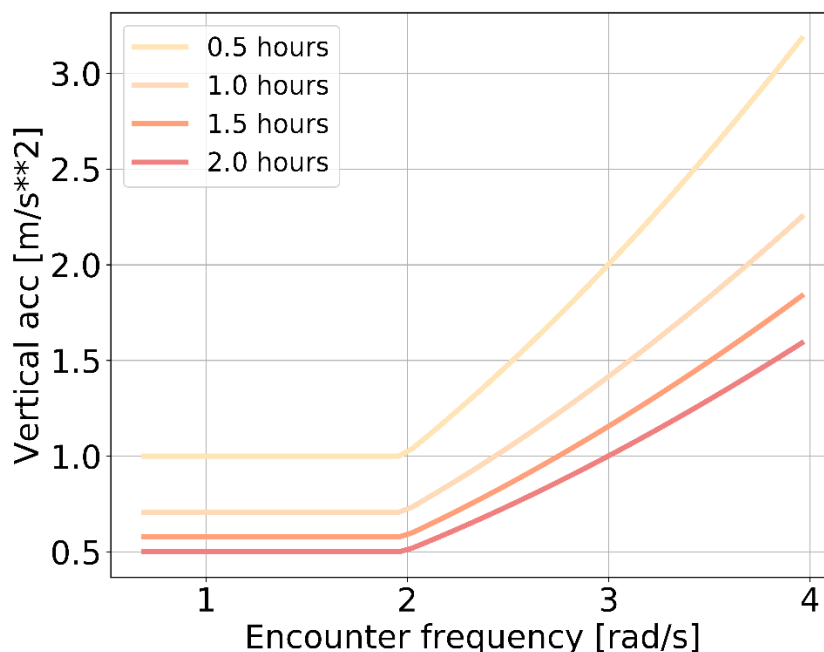


Figur 45: RMS-verdi av vertikale akselerasjoner gjennom 12 mnd operasjon for Flyer-fartøyer og konvensjonelle katamaraner. På rutene Trondheim-Kristiansund og Trondheim-Brekstad sammenlignes Flyer 30 og en konvensjonell 40-meters katamaran med samme vekt. På ruta Trondheim-Vanvikan sammenlignes Flyer 20 og en konvensjonell 27-meters katamaran med ti tonn høyere vekt.

Sannsynlighet for sjøsyke



Med et omfattende datasett for akselerasjonsverdier i passasjersalongen har vi mulighet til å beregne statistikk for sjøsyke. Sjøsyke er avhengig av mange faktorer, men forskning viser at det i hovedsak er avhengig av eksponeringstid, akselerasjonsnivå og frekvens [23]. Det finnes flere måter å beregne sjøsyke på, og ingen metoder er helt nøyaktige. En utbredt måte å beregne det på er imidlertid gitt i ISO 2631-1-standard. Denne angir grenseverdier for når man kan forvente at 10% eller flere av passasjerene er vesentlig sjøsyke. 10% er et høyt tall – i de store hurtigbåtene vi arbeider med i utviklingskontrakten vil det si at 27 personer er sjøsyke. Med tre toaletter om bord er det helt sikkert at det blir dårlig stemning i en slik situasjon.



Figur 46: ISO 2631-1 Motion Sickness Incidence Criterion. Angir grenseverdier for vertikale akselerasjoner ved gitte frekvenser. Ved overskridelse av grenseverdien kan det forventes at 10% av passasjerene i fartøyet blir sjøsyke.

For å estimere sjøsyke gjennom ISO 2631-standarden har vi måttet gjøre en del antakelser:

- Representativ akselerasjon kan finnes fra 1.414 ganger RMS-akselerasjonen i irregulær sjø. Dette er forholdet mellom akselerasjonsamplitude og RMS-akselerasjon for enkle harmoniske oscillasjoner.

- Representativ frekvens er den frekvensen som samsvarer med den høyeste oscillasjonsenergien for båtens respons på innkommende bølger.
- Man beholder marsjfart selv i dårlig vær

En siste antakelse handler om eksponeringstid. ISO 2631 antar at man har konstante akselerasjoner gjennom en gitt eksponeringstid. I våre simuleringer beregner vi akselerasjoner og frekvenser gjennom ulike segmenter av turen, vist som representative punkter i Figur 41. Hvis man behandlet disse segmentene som helt uavhengige turer ville man fått resultater som underpredikterer sjøsyke vesentlig. Som et tenkt eksempel kunne man hatt to etterfølgende rutesegmenter med like bevegelser der man var helt på kanten av å bryte sjøsykekriteriet i begge segmenter uten at kriteriet regnes som brutt. I realiteten burde eksponeringstiden her regnes for begge segmentene sammenlagt. For å ta hensyn til denne type akkumulert sjøsyke har vi gjennomført følgende prosess:

- 1 ISO 2631 beregnes for hvert rutesegment som om det var uavhengig av resterende segmenter på ruta
- 2 For hvert rutesegment på hver rute telles antall øvrige rutesegmenter der man er nærmere brudd på ISO 2631 enn på dette segmentet.
- 3 En ny evaluering av sjøsykekriteriet gjøres for hvert rutesegment med eksponeringstid lik tiden tilbrakt på det segmentet pluss tiden tilbrakt på segmenter der man er nærmere brudd på kriteriet.
- 4 Hvis sjøsykekriteriet brytes på ett eller flere segmenter av ruta regnes turen som sjøsykefremkallende.
- 5 På rutene Trondheim-Brekstad og Trondheim-Kristiansund sammenlignes Flyer 30 med en konvensjonell 40-meters katamaran med samme vekt. På ruta Trondheim-Vanvikan sammenlignes Flyer 20 med en 27 meters katamaran med vekt som om den hadde batteridrift, rundt regnet ti tonn høyere vekt enn Flyer 20.

Med disse antakelsene har vi evaluert alle simuleringer i datasettet nevnt over. Resultatene er oppsummert i Tabell 2. Det mest interessante ved disse resultatene er den store forskjellen i antall sjøsyketurer – en tur der ISO 2631-kriteriet blir brutt – på ruta mellom Trondheim og Kristiansund. Her spår simuleringene at man bryter ISO-kriteriet på hele 5 % av de totalt 1872 årlige turene på ruta – 94 turer totalt. Disse tallene forutsetter at man aldri reduserer hastigheten eller endrer kursen for å tilpasse seg værforholdene, noe som kan gi noe pessimistiske anslag på sjøsyke. Beregningsmetoden for sjøsyke identisk for Flyer-fartøyene og for de konvensjonelle katamaranene, så sammenligningen er rettferdig og gir dermed nyttig innsikt. Med samme evalueringsmetode finner vi ingen tilfeller i nåværende datasett av at Flyer 30-fartøyet bryter sjøsykekriteriet på ruta mellom Trondheim og Kristiansund.

På ruta mellom Trondheim og Brekstad ser det ikke ut til at sjøsyke er et vesentlig problem. Som nevnt i forrige delkapittel kjører båten i all hovedsak parallelt med retningen på fjorden på denne ruta, og får dermed sjøen mer eller mindre direkte i baugen eller hekken mesteparten av tida. Ruta går også i relativt skjermede farvann, utelukkende inne i Trondheimsfjorden. Båtene som sammenlignes er store – 30 og 40 meter – og veier relativt mye på grunn av batteripakkene. For de av leserne som har personlig erfaring med denne ruta er det verd å nevne at man i dag kjører en 25-meters båt med annen skrogform og rundt regnet halv vekt av fartøyene som simuleres her. Sjøsykesimuleringene i nåværende studium er derfor ikke gyldige for dagens situasjon. Siste ruta i studiet er den korte pendlerruta som krysser fjorden mellom Trondheim og Vanvikan. Her ser det heller ikke ut til at sjøsyke er et vesentlig problem, men simuleringene viser i alle fall at problemet ikke er helt fraværende. Disse spår at man bryter ISO 2631-kriteriet på 0.1 % av overfartene, eller seks turer per år.

For alle ruter angir den presenterte statistikken kun verdier for hvorvidt ISO 2631-kriteriet brytes, noe som først skjer når man forventer at 10% av passasjerene opplever sjøsyke. Vi vurderer det som sannsynlig at en andel passasjerer mellom 0% og 10% opplever sjøsyke på mange av turene der kriteriet ikke blir brutt. Vi har ikke funnet noen sjøsykekriterier eller standarder som kan spå dette på en god måte ut fra datagrunnlaget i nåværende studium.

Tabell 2: Årlige turer med overskridelse av ISO 2631-1-kriteriet for sjøsyke.

Rute	Flyer 30/Flyer 20		Konvensjonell 40m/27m	
	Antall turer	Prosentandel	Antall turer	Prosentandel
Trondheim – Kristiansund	0	0 %	94	5.0 %
Trondheim – Brekstad	0	0 %	0	0.0 %
Trondheim – Vanvikan	0	0 %	6	0.1 %

Sjøsykeestimer blir aldri eksakte, og fremgangsmåten som er brukt i nåværende arbeid kan helt sikkert utbedres. Siden samme fremgangsmåte er brukt ved evaluering av de konvensjonelle fartøyene og Flyer-fartøyene mener vi at datagrunnlaget definitivt gir en representativ sammenligning mellom de to. Forskjellene er såpass store at man også kan si uten tvil at de er signifikante, og at Flyer-fartøyene vil gi en vesentlig reduksjon av sjøsyke relativt til alternative fartøytyper. Alle som har opplevd sjøsyke, og spesielt de som også er avhengig av hurtigbåt for daglig eller ukentlig pendling, vet å sette pris på denne forskjellen!

Det er verd å nevne at sjøsykekriterier bare er ett av flere aspekter av passasjerkomfort. Kraftige bevegelser av båten kan oppleves ubehagelig og begrense mulighetene til å gjennomføre nyttig arbeid underveis på overfarten. Man må derfor se både på sjøsykestatistikken og på akselerasjonsstatistikken i Figur 45 for å få et godt bilde av opplevd passasjerkomfort på rutene.

FREMDRIFTSSYSTEM

Fremdrift av et hydrofoilfartøy er grunnleggende mer utfordrende enn for en konvensjonell hurtigbåt. Dette fordi skroget er løftet ut av vannet, noe som fører til at vanlige propell- og vannjettsystemer vil ventilere og ikke fungere som tiltenkt. Man må derfor benytte andre løsninger. Konsortiedeltakerne har jobbet med denne problemstillingen både før og under arbeidet med utviklingskontrakten. Et stort antall mulige løsninger har vært vurdert, og mange beregninger og vurderinger av fordeler og ulemper har vært gjennomført. Basert på dette foreslås en fremdriftsløsning som er energieffektiv, robust og mulig å ferdigutvikle innen nødvendig byggestart for hurtigbåter som skal operere fra medio 2022.

Kravspesifikasjon

Som grunnlag for vurderinger av ulike fremdriftssystemer har vi lagt til grunn en rekke krav som disse må oppfylle. Disse kan oppsummeres som følger:

Høy propulsjonsvirkningsgrad i marsjfart

I fremtidens nullutslippsregime er energibruk alfa og omega. Som nevnt ellers i rapporten er vekten av nullutslipps kraftsystemer vesentlig høyere enn for dieselmotorsystemer. Høy propulsjonsvirkningsgrad er like viktig som lav motstand for totalt energiforbruk på en rute, og det hjelper dermed lite å redusere motstanden med hydrofoiler om virkningsgraden på fremdriftssystemet faller tilsvarende. Høy propulsjonsvirkningsgrad er dermed et av de viktigste kriteriene i vår vurdering av fremdriftssystemer.

Stor skyvkraft ved take-off

Ved take-off er motstanden på en hydrofoilbåt ganske lik den man har ved toppfart. Dette i motsetning til hva som er tilfelle for en konvensjonell båt, der motstanden øker som en tilnærmet kvadratisk funksjon av hastighet gjennom hele hastighetsspekteret. Muligheten til å oppnå stor skyvkraft ved lave hastigheter er dermed viktigere for en hydrofoilbåt enn for en konvensjonell katamaran.

Manøvrering ved sakte fart

Hurtigbåter legger ofte til kai i trange havner i værutsatte områder. Man er derfor avhengig av gode manøvreringsegenskaper. Konvensjonelle fremdriftssystemer for hurtigbåter tillater rotasjon om egen akse og en viss grad av traversering sidelengs uten vesentlig foroverhastighet. Dette ønsker vi å opprettholde med den nye fremdriftsløsningen.

Robusthet og lavt vedlikeholdsbehov

En ting som skiller passasjerhurtigbåter fra andre hurtiggående båter, er at de opererer svært mange timer per år. På ruta mellom Trondheim og Kristiansund opererer hver båt mer enn 6 500 timer per år, og med en tett ruteplan er det lite rom for langvarige reparasjoner mellom årlige servicer. Det er derfor ønskelig å finne en fremdriftsløsning som i størst mulig grad bygger på velprøvde komponenter, og der komponentene er lett tilgjengelige for utskifting ved eventuelle feil eller skader.

Evaluerte alternativer

Konsortiet har vurdert et stort sett fremdriftsløsninger før man kom frem til endelig design. Vi ser det som fornuftig å presentere noen av disse, slik at leseren kan gjøre egne vurderinger av vår løsning

mot andre alternativer. Vi skiller fremdriftsalternativene i tre hovedkategorier: De med motor plassert over vannflaten og propell under, de med både motor og propell under vann og de med både motor og propell over vann.

Motor over vann, propell under vann

Skråstilt propellaksel

På mange av de tradisjonelle hydrofoilbåtene som er kjent fra operasjon i norske fjorder på 1950-1970-tallene benyttet man et fremdriftssystem med motor plassert over vann og propell under vann. Systemet ble også benyttet på de russiske Cometa-båtene, som man gjerne kan se i middelhavsområder (Figur 48). Propellakselen går skrått ned fra fremre del av skroget til et punkt under hekken på båten.



Figur 47: MS Vingtor, med skråstilte propellaksler så vidt synlig under aktre del av skroget. Foto: Stavanger Maritime Museum



Figur 48: Russiskdesignet Cometa-hydrofoil

En fordel med skråstilt propellaksel er at man unngår komplisert mekanikk under vann, og dermed er relativt godt sikret mot langvarig driftsavbrudd på grunn av feil på gir, vanntettinger, motorer eller lignende. På den andre siden har man en del ulemper, blant annet tap av virkningsgrad på grunn av skråstilt propell, ekstra motstand på aksler og akselbraketter og vesentlig risiko for skader på propellaksler ved påkjørsel av objekter i vannet.

Vinkelgir

En annen metode for å overføre moment fra motor over vann til propell under vann er å benytte en vertikal propellaksel inne i en av foilstøttene, med et vinkelgir som gir horisontal propellaksel i bunn. Fordelen med dette er mulighet for høy propulsjonsvirkningsgrad. På den andre siden har man ulempen at man har et høyt belastet gir under vann, noe som potensielt kan føre til lengre driftsavbrudd ved feil på dette. Sistnevnte er blant annet relevant i tilfeller der propellen treffer objekter i vannet, noe som vil gi store momentbelastninger på giret med potensielt påfølgende utskiftingsbehov.

Motor og propell under vann

Elektrisk pod uten gir

Den store drømmen for alle som arbeider med fremdrift av skip er gjerne en enkel fremdriftsløsning der man plasserer en elektromotor i et strømlinjeformet hus, med direkte kobling til propellakselen. En slik løsning er svært enkel mekanisk – uten gir og med bare én sammenhengende roterende komponent. I tillegg eliminerer man alle effekttap knyttet til giring, og man åpner for rotasjon av hele enheten og dermed for påføring av manøvreringskraft i vilkårlige retninger. Konsortiet har arbeidet med tidligfasekonsepter for denne type løsning, for å vurdere potensialet for å bruke det på et hydrofoilfartøy.



Figur 49: Konseptdesign av elektrisk pod for bruk i hydrofoilbåt

Konklusjonen fra dette arbeidet er per i dag at en slik løsning ville vært optimal, om det ikke hadde vært for at elektromotorene som trengs enten må ha veldig stor diameter, eller være ekstremt lange. Våre data tilsier dessverre at motorhuset må ha så stor diameter og være så langt, at det vil gi mye ekstramotstand og dermed redusere fremdriftsvirkningsgraden vesentlig. Prinsippet med direkte kobling mellom propell og motor fungerer fint i luft – man ser det mellom annet på de aller fleste droner – men er vanskelig overførbart til vann. Propeller som opererer i vann har vesentlig høyere moment relativt til propelldiameter enn propeller som opererer i luft, noe som gir vesentlig endrede proporsjoner mellom motor- og propellstørrelse.

Elektrisk pod med gir

En mulig løsning på utfordringen med stor momentbelastning på elektromotoren i en podløsning er å gi elektromotoren. Dette kan for eksempel gjøres ved bruk av et planetgir inne i pod-enheten. Da kan man bruke elektromotorer av mindre størrelse, og komme unna med et motorhus av mindre størrelse.

Denne løsningen er dessverre heller ikke uten problemer. Ved plassering av et planetgir inne i et nedsenket motorhus kommer man tilbake til utfordringene nevnt ved vinkelgir-løsninger over. Ved påkjørsel av objekter i vannet vil man få store momentbelastninger på giret, og man risikerer å ødelegge dette. Siden motorhuset er plassert under vann er det en mer omfattende operasjon å få fartøyet tilbake i drift, enn hvis giret stod inne i skroget. Vi ser likevel ikke bort ifra at noen kan klare å lage gode løsninger på disse problemene, og å utarbeide et produkt som gir tilstrekkelig pålitelighet for bruk i hurtigbåt.

Motor og propell over vann

Vannjet med forlenget inntakskanal

Den mest velprøvde fremdriftsløsningen i tidligere hydrofoilbåter er vannjet. Prinsippet ble brukt på Kværner Fjellstrand sin Foilcat, Boeing sin Jetfoil, og på de fleste militære hydrofoilmartøyer i US Navy. For å kunne benytte vannjet på en båt som flyr over vannflaten er man avhengig av å forlenge vanninntakskanalen under skroget, til et punkt under vann. Med riktig design kan man oppnå god propulsjonsvirkningsgrad. Mer detaljer om denne type løsning følger under.



Figur 50: Kværner Fjellstrand FoilCat med vannjettfremdrift

Luftpropulsjon

Selv om det ved første tanke kanskje kan høres ut som et noe merkelig prosjekt har konsortiet studert muligheten for bruk av luftpropeller for fremdrift av hydrofoilbåter. Med en slik løsning kunne man fått flere store fordeler:

- Mulighet for direkte elektromotordrift og dermed et mekanisk enkelt system
- Ingen deler under vann, noe som gjør vedlikehold og utskifting av komponenter enkelt
- Fullstendig unngåelse av kavitasjonsproblemer, noe som tillater design av mer effektive propeller enn hva som er mulig i høy hastighet under vann



Figur 51: US Navy Landing Craft Air Cushion (LCAC) med luftpropulsjon. I dette tilfellet to store vifter akterut, drevet av hver sin gassturbinmotor.

For å få tilstrekkelig kraft med god virkningsgrad er man avhengig av vesentlig større propellareal enn hva man trenger ved fremdrift i vann. Den utfordringen er imidlertid ikke uoverkommelig. Hurtigbåter er relativt brede, og i de fleste tilfeller opererer de ikke i områder der dagens høyde er nær maksimal høyde under broer og lignende. Det er derfor mulig å plassere tilstrekkelig propellareal over hekken på båten, faktisk tilstrekkelig areal til å oppnå vesentlig høyere propulsjonsvirkningsgrad enn hva man har på dagens fremdriftssystemer. En slik løsning vil definitivt se annerledes og spektakulær ut, men den er ikke teknisk umulig å få til. På den negative siden har man imidlertid det som viste seg å være en showstopper i denne omgang, nemlig støyproblematikk. Hurtigbåter betjener havner i og nært tettbygde strøk, og kan derfor ikke ha vilkårlig høyt støynivå. Med et sett tiltak mot støy – blant annet dyser og spesielle vingeprofiler på propellene – kan man oppnå et lavere støynivå enn hva man har for fly. Likevel blir denne løsningen vurdert som uaktuell i nåværende studium.

Flyer Thrust Unit

Etter gjennomgang av alle grunnprinsippene nevnt over ble det bestemt at man skulle arbeide videre med en løsning basert på vannjetprinsippet. Dette har vært testet i flere ulike utgaver på tidligere hydrofoilbåter, og det finnes forskningslitteratur om hvordan man bør designe vannkanalene for å oppnå god ytelse. Både US Navy sin Pegasus-klasse med militære hydrofoilfartøyer, verdens mest utbredte hydrofoilfartøy Boeing Jetfoil og Kværner Fjellstrand sin FoilCat benyttet vannjetfremdrift. Mange av disse fartøyene ble bygget på 1970-tallet og er fortsatt i daglig drift. Det er altså lite tvil om at løsningen kan bygges på en robust måte.



Figur 52: Boeing JetFoil



Figur 53: Pegasus class hydrofoil

Fordelene med vannjetfremdrift av våre fartøydesign er flere. En kort versjon følger her:

God virkningsgrad også ved høy hastighet.

Flyer 20 og Flyer 30 designes med 40 knop marsjhastighet. Dette er høyere hastighet enn de aller fleste hurtigbåter i operasjon i dag, og byr på utfordringer knyttet til kavitasjon om man skulle benyttet konvensjonelle propeller. Vannjet baserer seg på et prinsipp der vannhastigheten blir redusert inne i en kanal rundt selve propellenheten – strengt tatt kalt impeller – noe som reduserer kavitasjon og tillater utforming av mer effektive propellblader.

Kun passive komponenter under vann

Et vannjetsystem for hydrofoilbåt har komponenter under vann, men disse består utelukkende av en eller flere vannkanaler uten bevegelige deler. Vannkanalen har en sofistikert geometri og er således en avansert komponent, men siden den ikke har noen bevegelige deler er den fra et operasjonssynspunkt svært enkel. Ingen slidedeler må skiftes, og ved påkjørsel av små objekter i vannet er det også lite sannsynlig at den vil ta betydelig skade. Om man støper den av komposittmateriale og beholder formene er det også relativt billig å skifte den i et tilfelle der man kjører båten på grunn eller treffer et stort objekt i vannet.

Gode manøvreringsegenskaper

Et vannjetaggregat kan påføre krefter i 360° retning, og kan skifte kraftretning svært raskt. Med et konvensjonelt vannjetoppsett der man har individuelt styrbare vannjetaggregater ytterst på hver side av fartøyet akterut har man mulighet til å kjøre fartøyet i nøyaktig den retningen man ønsker. Det kan være direkte sidelengs eller i rotasjon om sin egen akse. Vår foreslåtte løsning beholder denne egenskapen.

Stor skyvkraft ved take-off

Et godt designet vannjetsystem kan gi like stor eller større skyvkraft ved $\frac{2}{3}$ av marsjhastighet enn ved marsjhastighet. Dette er en fordel for hydrofoilfartøyer, da man har sammenlignbar motstand ved take-off som ved marsjhastighet.

Enkelt oppsvingingssystem

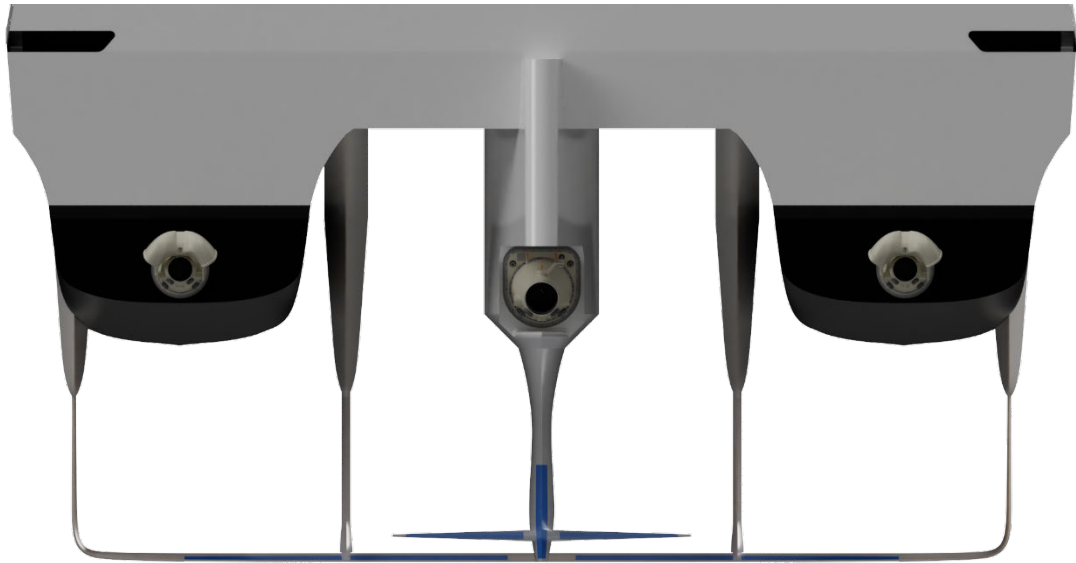
Selv om det ikke foreslås for Trøndelagsanbudet arbeider deltakere i konsortiet med løsninger for hydrofoilsystemer som kan redusere dypgangen ved kjøring i grunne områder. Vannjet er godt egnet for slike systemer, siden man ikke trenger overføre mekanisk eller elektrisk kraft gjennom undervannsdelen av systemet. Både Pegasus- og JetFoil-fartøyene hadde oppsvingbare hydrofoilsystemer med integrert vanninntakskanal for vannjet.



Figur 54: Pegasus-hydrofoiler med oppsvingede hydrofoilsystemer

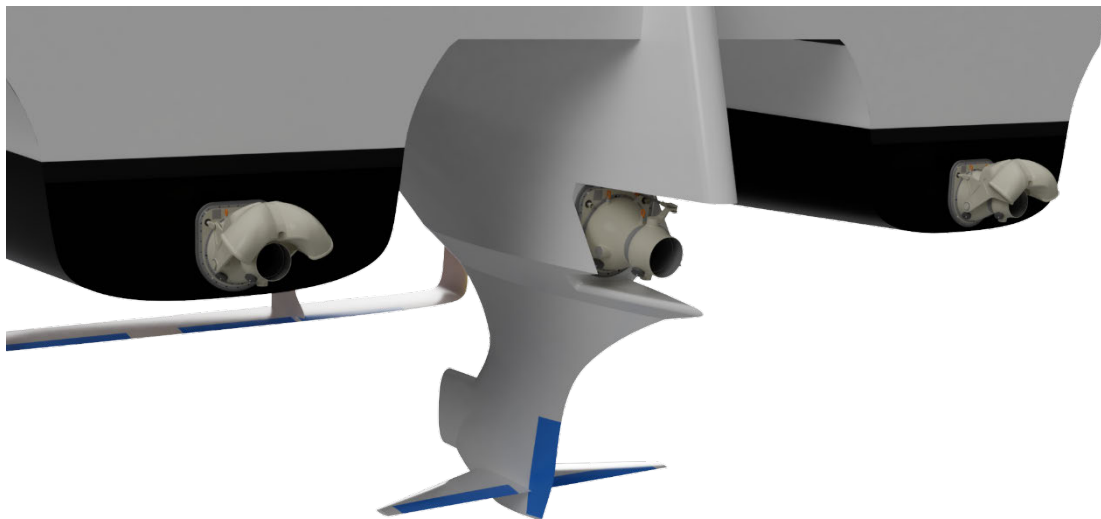
Design

Flyer Thrust Unit er et tredelt system bestående av én enkelt hovedvannjet og to manøvreringsvannjetter. Det overordnede designet er basert på den innsikten at én felles vannkanal for alt vannet som skal brukes til fremdrift vil være mer energieffektivt enn fordeling mellom to eller flere vannkanaler. Dette på grunn av grunnleggende fysiske prinsipper som fører til at forholdet mellom overflateareal og volumstrøm blir lavere med en stor kanal enn ved flere små. Valget om å gå for en enkelt hovedvannjet gir dermed et godt utgangspunkt for minimering av motstand på undervannsdelen av vannkanalen, siden motstanden gjerne er proporsjonal med arealet under vann.

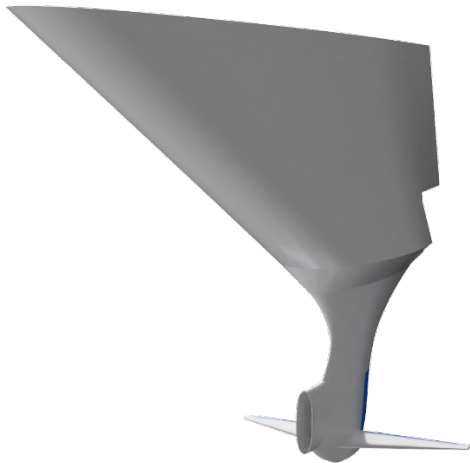


Figur 55: Flyer 30 sett direkte bakfra. Hovedvannjet i midten og manøvreringsvannjetter i hvert skrog.

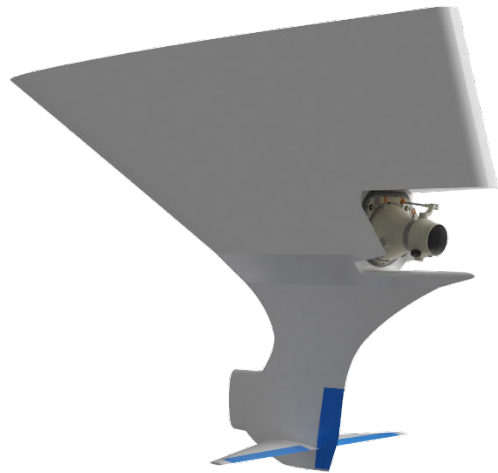
En enkelt vannjet vil ikke kunne gi de manøvreringsegenskaper som man er kjent med fra vannjetfremdrift. Et system med bare en fremdriftsenhet vil heller ikke kunne tilfredsstille krav til trygg retur til havn etter enkeltfeil på fremdriftsanlegget. Flyer Thrust Unit inneholder derfor to mindre vannjetaggregater i tillegg til det store hovedaggregatet. Disse er plassert i hvert sitt skrog, tilsvarende posisjonen til vannjetter i konvensjonelle hurtigbåter. Systemet gir dermed mulighet for manøvreringsegenskaper tilsvarende de man finner på dagens hurtigbåter og det tillater kjøring til havn for egen maskin selv ved feil på en av vannjetene. En tilleggsfordel er at de to sidevannjetene – som ikke har forlenget vanninntakskanal til vannflaten – kan brukes for å gi ekstra skyvkraft ved take-off. På den måten kan man få en raskere overgang fra stillestående til flyvende operasjon, og minimere energibruk knyttet til akselerasjonsfasen. Hovedoppsettet på systemet kan ses i Figur 55.



Figur 56: Flyer Thrust Unit, sett skrått bakfra.



Figur 57: Hovedenhet i Flyer Thrust Unit sett skrått forfra



Figur 58: Hovedenhet i Flyer Thrust Unit sett skrått bakfra

Kjernen i Flyer Thrust Unit er den kombinerte vanninntak- og halevingeenheten mellom skrogene i hekken, vist i Figur 57. Vi kan ikke avsløre alle detaljer om innmaten i denne i en offentlig rapport. Hovedtrekkene kan vi likevel forklare:

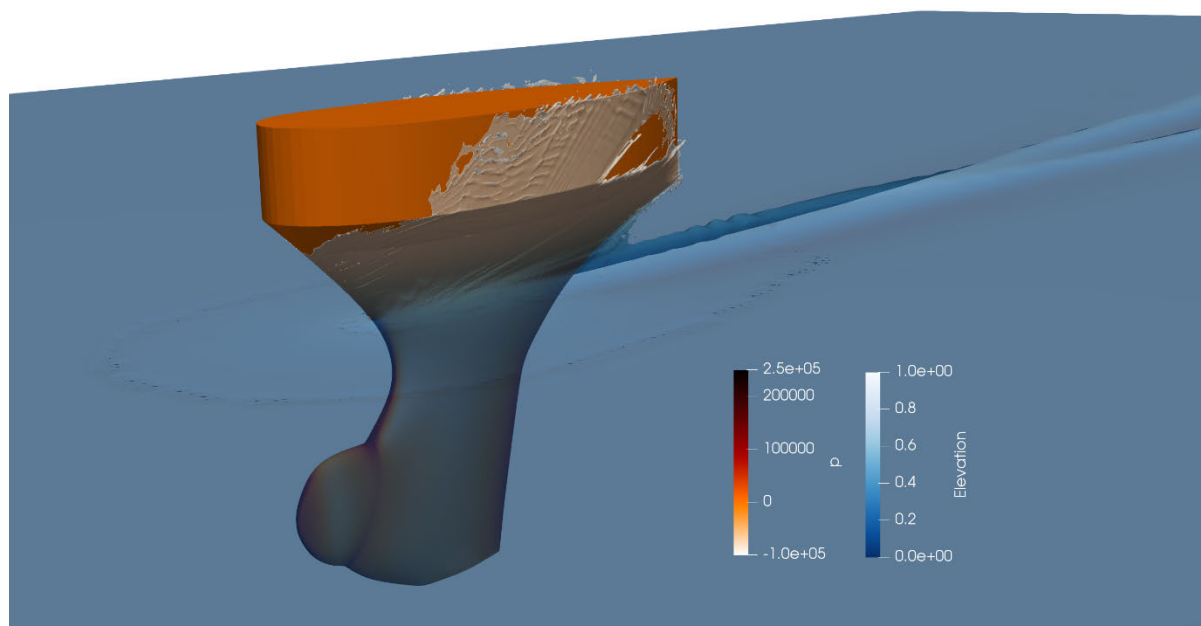
- Vann strømmer inn gjennom en åpning i oppstrøms ende, og svinges oppover inne i vannkanalen
- Vannet når vannjetpumpa over vannflata med samme hastighet og trykk som ved innstrømning i en konvensjonelt montert vannjet. Selve vannjetaggregatet merker dermed ingen forskjell på operasjon i Flyer-fartøyene og i en konvensjonell hurtigbåt. Det kan dermed være et standardprodukt, tilsvarende det man bruker på dagens hurtigbåter.
- Elektriske motorer montert inne i rommet foran vannjeten driver drivakselen
- Enheten bygges i karbonfiberkompositt for minimal vekt og stor stivhet.

Designet på vanninntakssystemet er et resultat av en sammensatt prosess der mange hydrodynamiske effekter må tas høyde for. I hovedsak dreier dette seg om å estimere motstand på utsiden av kanalen, strømnings tap inne i kanalen, tap fra vannjetpumpa og tap fra såkalt momentumteori. Mange av effektene gir motstridende føringer om størrelse og form på vanninntaket. Konsortiet har utviklet matematiske modeller for de ulike strømningseffektene, og kan optimalisere geometrien basert på disse. Resultatene antyder at vi kan nå en propulsjonsvirkningsgrad på [redacted], bare [redacted] prosentpoeng lavere enn hva man har med tilsvarende vannjet montert konvensjonelt i et katamaranskrog. Ytre motstandskoeffisient på haleenheten estimeres til å være [redacted]. Dette er i samme størrelsesorden som det hva man ville hatt på en optimalisert vingeform med samme areal.



Figur 59: CFD kjøring av vannjetintak. Her for å finne indre strømningsmønster og å finne ut hvorvidt man risikerer strømningsseparasjon i de krappe svingene i kanalen.

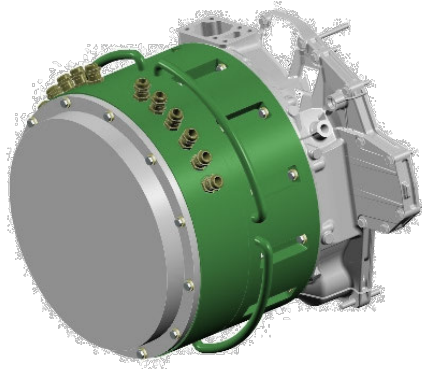
Med moderne simuleringsverktøyer basert på CFD har vi simulert strømmingen både på innsiden og utsiden av vanninntakskanalen. Visualiseringer fra dette kan ses i Figur 59 og Figur 60. Dette har gitt oss et godt bilde av hvordan vanninntaket bør designes for høyest mulig propulsjonsvirkningsgrad. Utviklingsarbeidet på denne fronten vil fortsette etter endt utviklingskontrakt, da vi er overbevist om at vi ennå kan klare å lage systemet mer effektivt enn hva vi legger til grunn i tallmaterialet som blir presentert i denne rapporten.



Figur 60: CFD-simulering av strømming rundt ytre geometri på vanninntak. Innløpshullet er lukket for å isolere effekten av ytre geometri fra strømnings effekter inne i kanalen.

Elektriske hovedmotorer

Vannjetene i fremdriftssystemet vil drives av elektriske permanentmagnetmotorer. I senterenheten av Flyer Thrust Unit vil disse plasseres inne i det avlange rommet foran og over vannjetten. Manøvreringsvannjettenes motorer plasseres som i en konvensjonell hurtigbåt i et maskinrom akterut i hvert skrog. Elektromotorerne har blitt valgt fra Westcon Power & Automation sin lettvekts e-SEA motorserie. Motorene styres av motorkontrollere fra e-SEA Drive-serien. Sammen med vannjetter utgjør dette en svært vekteffektiv og mekanisk enkel drivlinje. Utstyrsserien er mellom annet utprøvd i sightseeingfartøyet Future of The Fjords, bygget av Brødrene Aa.



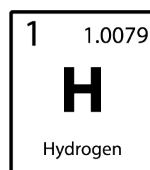
Figur 61: e-SEA Matic elektrisk permanentmagnetmotor

Som med alt annet utstyr i en hurtigbåt er vekt av avgjørende viktighet også for drivlinjen. Tabell 3 oppsummerer vektallene som er brukt i nåværende studium. Dette er basert på reelle tall fra utstyr i e-SEA-serien av elektromekanisk utstyr, samt vannjettaggregater fra etablerte leverandører i bransjen.

Tabell 3: Vekt per enhet motoreffekt brukt i dimensjonering av kraftforsyning

Type utstyr	Vekt per effekt [kg/kW]

KRAFTFORSYNING



Målet med hele dette prosjektet var å prosjektere hurtigbåter som ikke har utslipp av skadelige gasser – verken lokalt eller globalt. I praksis innebærer dette to alternativer for energilagring; batteri og hydrogen. Det finnes andre alternativer om målet kun var å redusere globalt CO₂ utslipp. For eksempel kan biodrivstoff – om det produseres på en bærekraftig måte – være et CO₂ nøytralt drivstoff som vil passe hurtigbåtdrift. Problemet er at denne type drivstoff har lokale utslipp på samme måte som fossildrivstoff, og har derfor ikke blitt vurdert i dette prosjektet. Denne begrensningen i valg av energibærer er spesifisert av Trøndelag Fylkeskommune i oppdragsbeskrivelsen.

I starten av prosjektperioden vurderte vi både hydrogen og batteridrift parallelt. Antagelsen var at batteridrift ville være den mest økonomiske løsning på korte til mellomlange ruter, som Trondheim – Vanvikan og Trondheim - Brekstad, mens hydrogendrift kom til å bli nødvendig på den lengste ruta, Trondheim – Kristiansund. Etterhvert som prosjektet utviklet seg har vi endret mening når det kommer til hydrogen. Istedenfor å prosjektere to båter med forskjellig energilagringssystem har vi landet på at batterier kan brukes på alle rutene.

Hydrogendrift av en hurtigbåt er – i dag, og mest sannsynlig i nær fremtid – betydelig dyrere enn batteridrift (se eget kapittel om økonomi for mer om dette). Hvis kollektivtransport skal være et attraktivt og billig tilbud til innbyggerne i Trøndelag må kostnadene holdes under kontroll. Med bakgrunn i forskjellen i kostnader har vi derfor satt oss som mål å muliggjøre batteridrift av hurtigbåter i så stor grad som mulig. En del av løsningen er en kraftig reduksjon av energiforbruk, ved hjelp av Flying Foil AS sine energieffektive hydrofoiler. En like viktig løsning er å tilrettelegge for ladestopp på ruta ved å øke hastigheten fra dagens 33 knop og opp til 40 knop.

Vi har i dette prosjektet utviklet beregningsmetoder for dimensjonering av kraftsystem, både basert på batteri og hydrogen som energilagring. Data for batterier, hydrogentanker, brenselceller, elektromotorer og kraftelektronikk har blitt hentet inn fra flere underleverandører, hvor Westcon Power & Automation har vært systemintegrator på kraftsystemet. De viktigste parameterne i dette prosjektet har vært vekt og pris.

I denne delen av rapporten skal vi presentere dataene vi har hentet inn fra underleverandører, forklare hvordan vi har gjort dimensjoneringen av kraftsystemet, og presentere tall for energiforbruk, vekt og størrelse på kraftforsyningen ombord i båtene vi har prosjektert. Selv om vår anbefaling i dette prosjektet er å gå for en batteriløsning på alle rutene i Trøndelag presenterer vi også tall og data for hydrogen som energibærer. Dette er primært ment å være et sammenlikningsgrunnlag. Resultatene i denne seksjonen er av ingeniørteknisk interesse; energiforbruk og vekt på de forskjellige rutene. Omregninger til kostnader er gjort i det neste kapittelet om økonomi.

Batterier

Batterier som energilagring ombord i fremkomstmidler har de siste årene økt kraftig. Samtlige store bilprodusenter har en aktiv satsning på batterier i fremtidens biler. Aktører som Volvo og Volkswagen har offentlig uttalt at batteribiler skal stå for mer enn halvparten av salget innen 2025-2030 [24] [25]. Det er en aktiv satsning på batterier til drift av mer utfordrende segmenter som lastebiler [26] og fly [27], og ikke minst har batteribruken i maritim næring de siste årene gått kraftig opp, med både ferger [28], sightseeing fartøy [29] og arbeidsbåter [30]. Batteridrift av fremkomstmidler er dermed både en etablert industri, med et modent leverandørmarked, som forventes å vokse kraftig i tiden fremover. En elektrisk hurtigbåt eksisterer derimot fortsatt ikke. Hovedproblemet med elektriske hurtigbåter har frem til nå vært energiforbruket, som igjen fører til behov for store tunge batteripakker. I dette prosjektet benytter vi hydrofoiler til å kraftig redusere energiforbruket. Likevel er vekten av batteripakken fortsatt hovedutfordringen med en elektrisk hurtigbåt. Valg av batteripakke og tilhørende kraftforsyningsutstyr må dermed gjøres med kontinuerlig fokus på lav vekt.



Figur 62: Flere og flere typer fremkomstmidler blir etterhvert elektriske. Fra øverst til venstre: Den elektriske fergen MS Ampere, et fremtidig elektrisk fly utviklet av NASA, en elektrisk lastebil fra Tesla og det helelektriske sightseeing fartøyet Future of the Fjords

Generelt om batterier for maritim bruk

Det finnes flere leverandører av maritime batterier. I dette prosjektet har vi vurdert produkter fra seks forskjellige batterileverandører. En av disse leverandørene gikk konkurs under prosjektperioden (PBES) mens en annen ble kjøpt opp av en større aktør (Grenland Energy, som ble kjøpt opp av Corvus). Av de fire som er igjen er to basert i Norge, en i Nederland, og en i USA. Samtlige lager i praksis batteripakker ved å kjøpe inn battericeller fra store asiatiske og amerikanske selskaper som LG Chem, Panasonic, Kokam og XALT Energy. Cellene blir så satt sammen av de maritime batterileverandørene til en komplett batteripakke, som inkluderer batteristyring, sikkerhetsfunksjoner og godkjenning fra klasseselskap. Leverandørene som har vært med i vurderingen i dette prosjektet er listet opp i tabellen under.

Tabell 4: Batterileverandører som har vært vurdert i dette prosjektet

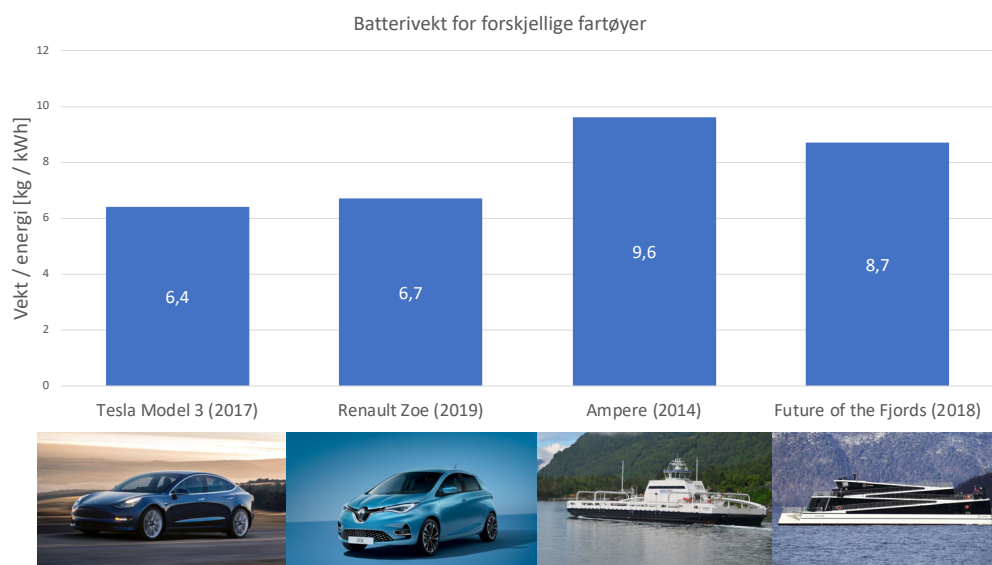
Selskap	Nasjonalitet	Referanseprosjekter
	Norge og Canada	- Norled AS, MF Ampere. Verdens første helelektriske ferge - Østensjø, Edda Ferd. Hybrid PSV-skip
 ZEM - Zero Emission Maritime solutions	Norge	- Vision of the Fjords og Future of the Fjords, i samarbeid med Brødrene Aa og The Fjords - Norsafe, elektriske livbåter
 EST-Floattech Intelligent Energy Storage Solutions	Nederland	- GVB, hybridferge i Amsterdam - Hybrid multi-purpose-skip i samarbeid med nederlandske myndigheter
	USA	- REV, forskningsskip i samarbeid med Vard - Første elektriske ferge i USA

Batterier for maritim bruk er basert på samme type grunnleggende kjemi som batterier i både biler, mobiltelefoner og det meste annet som drives av batterier i 2019, nemlig litium-ionbatteri. Det finnes derimot mange forskjellige varianter av litium-ionbatteri med forskjellige egenskaper. Se for eksempel referanse [31] for mer info om forskjellige litium-ionbatterier. Forskjellen ligger i hvilke materialer, og blandingsforholdet mellom materialene, som inngår i både katoden, anoden og elektrolytten i batteriet. Selv med like materialer i cellene er det mulig å endre egenskapene til batteriet ved å endre på materialstrukturen til de forskjellige komponentene.

Dette gjør at batterileverandørene ofte tilbyr flere typer batterier, ment til forskjellig bruk. Nøkkeldata fra de spesifikke produktene som har vært oppe til vurdering i dette prosjektet er listet opp i tabellen under. I denne tabellen er det presentert tre parametere. C-rate ved lading og utlading er et mål på hvor stor effekt batteriet tåler. Dette måles ved forholdet mellom effekt og energi i batteriet. Jo høyere C-rate, jo høyere kan effekten fra eller til batteriet være. C-rate ved lading er som regel lavere en C-raten ved utlading. Noen av tallene for C-rate ved lading er ikke oppgitt av produsentene direkte, men estimert av konsortiet ved å bruke typiske forholdstall. Disse tallene er merket med oransje farge i tabellen under. Det siste tallet er energitetthet mål ved kg / kWh. Dette tallet er regnet ut ved å dele batteriets totale energikapasitet på vekten av batteri med alt av nødvendig støttesystem (battery management, kjøling av batteripakken, rack osv). Vekten representerer altså en komplett batterimodul som leverer likestrøm som kan benyttes av andre komponenter i en kraftforsyningspakke.

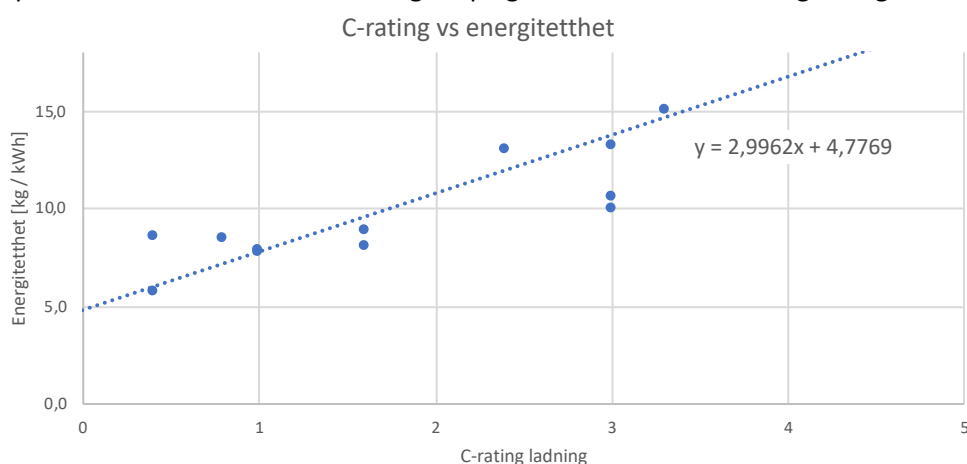
Produsent	Modellnavn	C-rating utlading	C-rating lading	Energitetthet [kg / kWh]
Corvus	Orca Energy	3	2,4	12,96
Corvus	Dolphin power	3	1,6	7,98
Corvus	Dolphin energy	0,5	0,4	5,68
EST-floattech	Green Orca 525	4	3	9,90
EST-floattech	Green Orca 620	1,25	1	7,66
EST-floattech	Green Orca 1050	2	1	7,81
ZEM	Energy	1	0,8	8,39
ZEM	Power & Energy	2	1,6	8,83
Spear Power Systems	SMAR-6N	4	3	10,53
Spear Power Systems	SMAR-3T	4	4	22,22
Spear Power Systems	SMAR-2P	20	3	13,16
Spear Power Systems	SMAR-2F	6,4	3,3	14,93

I praksis er batterier ment for maritim bruk som regel betydelig tyngre enn batterier til elektriske biler og mobiltelefoner. Et eksempel på dette kan sees i figuren under, hvor vekt per mengde lagret energi i fire forskjellige batteripakker er plottet opp mot hverandre.



Figur 63: Sammenlikning mellom vekt / energi for maritime batterier og bilbatterier

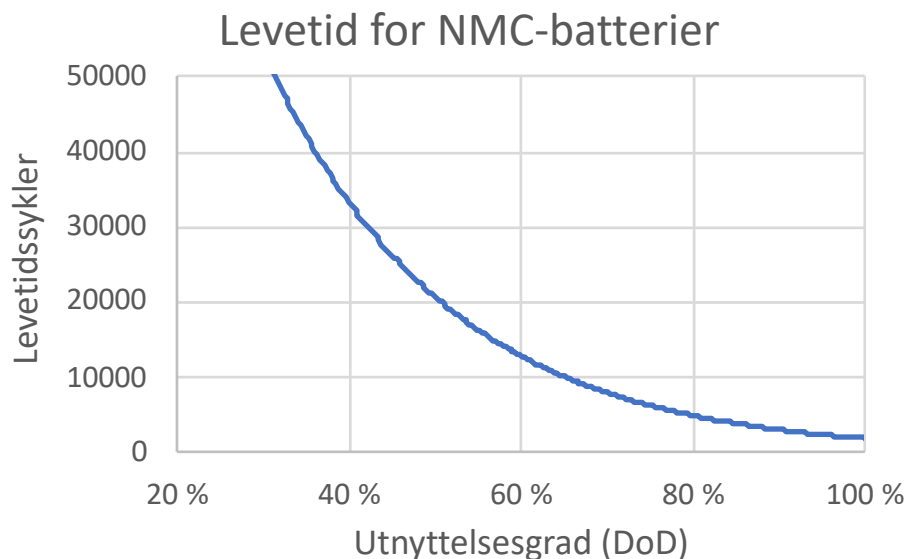
Det er primært to årsaker til at maritime batterier er relativt tunge: ladeeffekt og levetid. Forholdet mellom ladetid og vekt kan vi se ved å plote energitettheten for batteriene presentert i denne rapporten mot C-rate ved lading. Dette viser et fundamentalt forhold ved batterier: **økt effekt – om det er inn eller ut av batterier – fører til høyere vekt**. Hvis man har lyst på et batteri som kan lades hurtig ved hvert havneanløp har det store konsekvenser for vekten av batteriet. Dette er en typisk situasjon for elektriske ferger som ofte kun har noen minutter til kai før neste overfart begynner. Årsaken til at batteripakken til den elektriske ferga Ampere veier 50% mer per lagret mengde energi som batteripakken til Tesla Model 3 er i stor grad på grunn av behov for hurtig lading.



Figur 64: C-rate vs energitetthet for maritime batterier

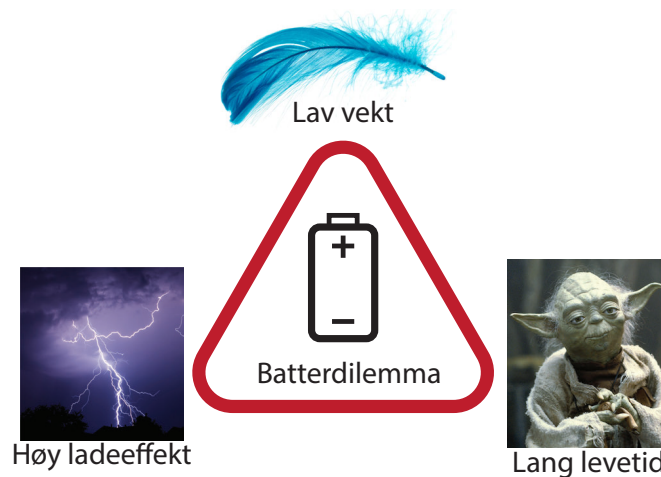
Den andre viktige årsaken er levetid. Et batteri blir gradvis degradert ved bruk, som vil si at kapasiteten til å lagre energi reduseres. En vanlig definisjon for levetid er tiden det tar til kun 80% av den originale kapasiteten er igjen. Det vil si, et batteri som operer på sine siste dager har mistet ca. 20% av energien det hadde tilgjengelig da det var nytt. Levetiden til et batteri er avhengig av flere faktorer, blant annet temperatur i batterirommet, alder uavhengig av bruk (ofte kalt kalendertid), antall sykluser, og hvor mye av batteriet som blir brukt i hver syklus, kalt «Depth of Discharge» (DoD). En vanlig måte å vise levetiden til et batteri er å plote antall sykluser som funksjon av DoD under

ideelle forhold. Et eksempel på dette kan sees i figuren under som viser levetiden til et litium-ionbatteri av typen «NMC» (katoden består av en litium-nikkel-mangan-kobolt-legering). De spesifikke tallene er basert på data fra en av batterileverandørene vi har vært i kontakt med for dette prosjektet.



Figur 65: Levetid som funksjon av utnyttelsesgrad NMC-batterier

Figuren viser at man effektivt kan øke levetiden til et batteri ved å redusere utnyttelsesgraden under normal bruk. Ved 80% DoD kan man for batteriet vist i figuren over forvente ca. 5 000 sykluser fra batteriet før kapasiteten til å lagre energi er redusert til 80% av hva batteriet hadde da det var nytt. Hvis DoD reduseres til 50% øker levetiden til godt over 22 000 sykluser. I dette tilfellet har vi da økt levetiden med 340%, men ettersom en mindre andel av batteriet kan brukes ved hver syklus har vi også i effekt økt vekten med 60%.



Figur 66: Batterier kan være lette, leve lenge og ha høy ladeeffekt, men ikke alt på en gang

I praksis er batteridimensjonering for et gitt fartøy en øvelse i prioriteringer. **Man kan ha batterier med lavt vekt, lang levetid og høy ladeeffekt, men man kan ikke ha alt på en gang.** Elektriske bilferger opererer med lav fart og kan derfor tillate høyere vekt i bytte mot lengre levetid og raskere lading. En elektrisk personbil trenger hverken spesielt lang levetid (man trenger kanskje ikke mer enn et par ladesykluser i uka), eller spesielt hurtig lading (man kan lade om natta, tross alt), slik at vekt i større grad kan prioriteres over andre egenskaper. Hurtigbåter er et sted midt imellom. Høy ladeeffekt og lang levetid er viktige faktorer, da tiden til havn er kort og antall ladesykluser per år er

høy. Likevel er energiforbruk og vekt så tett knyttet sammen for en hurtigbåt at lav batterivekt i større grad må prioriteres enn hva som er tilfelle for elektriske bilferger.

Potensiale i fremtiden

Dataene presentert i forrige seksjon representerer hva det er mulig å få kjøpt på markedet i dag. Å bruke dagens parametere direkte i et prosjekt som handler om fremtidens hurtigbåt kan være konservativt. De nye båtene for Trøndelag er forventet å bli satt i drift en gang mellom 2022 og 2024. Batterier utvikler seg fort – både i maritim næring og ellers – og teknologien kan allerede om få år være signifikant annerledes enn hva som er tilfelle i dag.

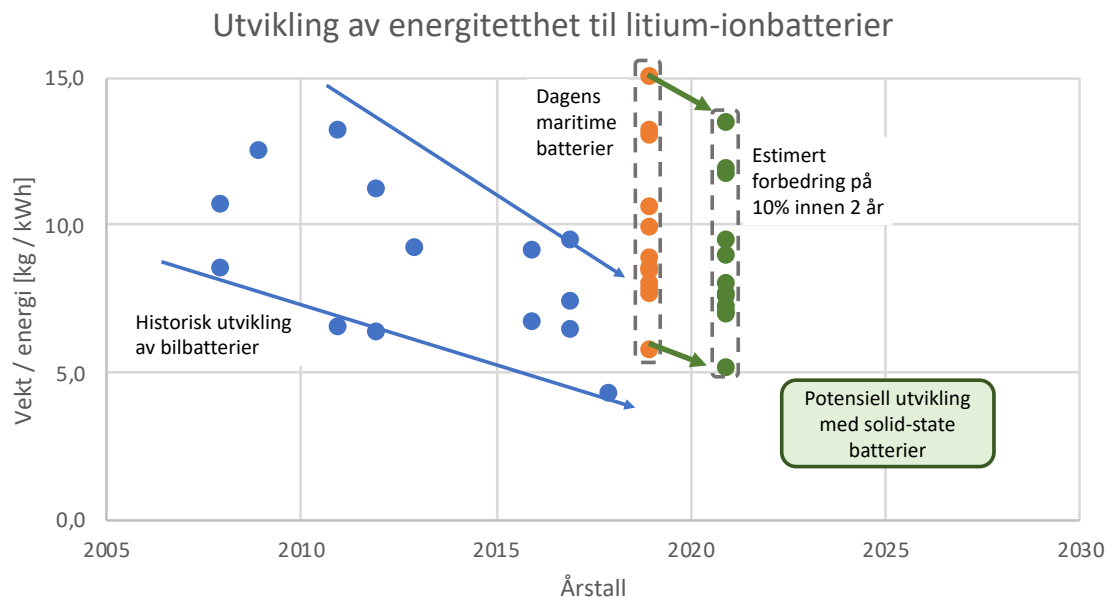
For å estimere vekten av batterier i fremtiden har vi gjort tre ting.

Først så vi på utviklingen av batterivekt fra et historisk perspektiv. Ettersom vekten av batteripakker er sterkt avhengig av både ladeeffekt og levetid er det viktig å sammenlikne batterier som brukes på noenlunde samme måte. Vi samlet derfor inn offentlig tilgjengelig data fra batteripakker i forskjellige elbiler, produsert på forskjellig tid. De første elbilene med litium-ionbatteri kom på markedet rundt 2008, med Tesla Roadster. Tidligere Elbiler brukte som regel andre, og betydelig tyngre, batterityper. Siden 2008 har det blitt lansert flere modeller, og noen av modellene har kommet i flere generasjoner. Tesla sine batterier kan brukes som et eksempel for batterivektutvikling. I 2008 var vekt delt på mengde energi for batteripakken i en Tesla Roadster 8,5 kg / kWh [32]. Ved lanseringen av Tesla Model S i 2012 hadde vekten av batteriet blitt redusert til 6,4 kg / kWh [33], tilsvarende 25% forbedring på 4 år. Tilsvarende historier kan fortelles om andre elbiler, som f.eks. Nissan Leaf med 35% forbedring av vekt på 7 år [34].

Det neste vi gjorde var å spørre flere av de maritime batteriprodusentene hva de tror kommer til å bli utviklingen de neste 2-4 årene. Ettersom utviklingen av nye produkter tar tid er utviklingen av batteriene som kommer på markedet om 1-2 år allerede godt i gang. Disse batteriene baserer seg på eksisterende teknologi, og benytter i stor grad innovasjoner fra elbilindustrien til å gjøre maritime batterier lettere. Maritime batterileverandører påstår at neste generasjon batterier passende for hurtigbåter vil være 10-20% enn dagens generasjon. Nøyaktig når disse batteriene kommer på markedet er fortsatt ikke helt klart, men forventet lansering er oppgitt til 1-2 år.

Sist men ikke minst finnes det flere er det aktiv utvikling av nye batteriteknologier basert på andre grunnleggende cellekjemier enn dagens standard. En spesielt lovende teknologi er «faststoffbatteri», eller «solid-state» batteri [35]. I denne typen batteri blir den flytende elektrolytten som eksisterer i dagens litium-ionbatterier byttet ut med et fast stoff, bestående av enten en type polymer eller en type keram. Potensialet til denne teknologien er halvering av vekt samtidig som både ladeeffekt og levetid potensielt kan øke. I tillegg er denne type batteri regnet som sikrere enn dagens batterier, da faststoffbatterier ikke tar fyr om de får en fysisk skade [36]. Faststoffbatterier har vært under utvikling i flere tiår allerede. Problemet med denne type batterier i dag er både av kjemisk og økonomisk natur. Det er vanskelig finne cellekjemi med tilstrekkelig stabilitet, og kostnadene knyttet til produksjonen av denne type batteri er fortsatt for høy. Flere store aktører mener likevel at solid-state batterier er like rundt hjørnet. Toyota påstår at de vil ha solid-state batterier i elbiler innen 2022 [37]. Selskapene Apple, Bosch, og Dyson har alle kjøpt opp teknologiselskaper som jobber med kommersialisering av solid-state batterier. Hvorvidt fremtiden vil bestå av faststoffbatterier, eller noe helt annet er vanskelig å si med sikkerhet. Vi anser det likevel som realistisk at batterier vil oppleve betydelig forbedring på lengre sikt, ved hjelp av helt nye og revolusjonerende cellekjemier. Om denne revolusjonen er klar allerede i 2022 – som Toyota påstår – eller om det tar lengre tid, er vanskelig å si. Vi har derfor ikke regnet med denne type batterirevolusjon i dette prosjektet, men anser det heller ikke som umulig at det kan skje innen 3-5 år.

Resultatene fra undersøkelsene vi har gjort rundt fremtidens batteriteknologi vises i figuren under. Basert på vår oppfatning virker det realistisk å forvente 10% forbedring i løpet av de neste to årene. Vi har derfor valgt å ta denne utviklingen med i prosjekteringen av fremtidens batteribåt.



Figur 67: Fremtidens batterier vil være signifikant lettere enn hva de er i dag

Kraftforsyningssystemet i dette prosjektet

Batteripakkene som er valgt i dette prosjektet er basert på tall fra Corvus Energy sin Dolphin serie for Flyer 30 og tall fra EST-floattech Green Orca 525 for Flyer 20. Dolphin serien ble valgt for Flyer 30 da disse batteriene tilbyr lav vekt, om en med noe begrenset C-rate. For Flyer 20 er hurtig lading regnet som viktigere, og et batteri med høyere C-rate er nødvendig. Ettersom dette prosjektet handler om batteribåter som skal settes i drift en gang mellom 2022 og 2024 har vi også prosjektert inn estimert forbedring av energitetthet. Kommunikasjon med flere av batteriprodusentene presentert i denne rapporten tyder på at vi kan forvente 10-20% forbedring av energitetthet om 1-2 års periode. Vi har antatt 10% forbedring i dette prosjektet, noe vi antar er på den konservative siden.

Levetiden til batteriene er justert for å minimere vekt samtidig som kostnader holdes under kontroll. Dette skjer i praksis ved å endre på «Depth of Discharge» (DoD) under normal bruk av batteriet. For elektriske ferger har normalen vært å bruke 10 års levetid for å dimensjonere DoD. Basert på antall ganger batteriet må lades opp per år – som er avhengig av den spesifikke ruta båten skal operere på – kan man justere DoD for å få tilstrekkelig levetid. Levetiden som brukes i denne dimensjoneringsmetoden er noe vi mener man bør revurdere for hurtigbåter. Ettersom økt levetid fører til høyere vekt er det kritisk å ikke overdimensjonere levetiden til et hurtigbåtbatteri. Som vi vil vise i kapittelet om økonomi så er både innkjøpskostnader og driftskostnader for batterier allerede på et nivå hvor det kan konkurrere med diesel. Vi foreslår derfor å redusere levetiden til batteripakken til 5 år, noe som fører til at vi kan operere med høyere DoD, og dermed få lavere vekt. Levetidsbegrensningen på DoD er satt til 64%. Dette er basert på antall ladesykluser per år på ruta Trondheim – Kristiansand og estimat fra Corvus på levetiden til deres batteripakker. Etter 5 års bruk må da batteripakken byttes ut. Sannsynligheten er stor for at en ny batteripakke etter 5 år kan bli signifikant lettere og billigere enn originalversjonen, som enten kan brukes til å øke rekkevidden på båtene eller redusere energiforbruket på grunn av lavere vekt. Batteriprodusentene oppgir selv at 99% av batteripakken kan resirkuleres etter endt bruk. Alternativt kan den gamle batteripakken brukes til andre formål, som er mindre vektkritisk.

I tillegg har vi valgt å prosjektere med en litt annen C-rate enn standardmodellene fra Dolphin Energy serien. I følge flere av batteriprodusentene er dette fullt mulig å gjøre, da battericellene brukt i både Dolphin Energy serien og de andre batteripakkene har et standard format, hvor det finnes flere celleprodusenter som tilbyr varierte egenskaper. Vi har dimensjonert batteriet for at lading skal kunne foregå på en halvtime for rutene Trondheim – Kristiansund og Trondheim – Brekstad. Ved 64% DoD tilsvarer dette at det trengs en C-rate ved lading på 1,3. Den prosjekterte vekten er en linearinterpolasjon på dataene fra batteripakkene til Corvus Dolphin serien for å relatere vekt til C-rate. Basert på kommunikasjon med produsenten er dette antatt å være en god modell for estimering av vekt av et spesialbestilt batteri.

Batteripakken brukt i dette prosjektet er altså basert på en spesialtilpasset versjon av Corvus Dolphin serien og EST-floattech Green Orca serien, med 10% estimert forbedring av energitetthet innen levering av batteripakken. Ettersom vekt er en kritisk parameter for hurtigbåt drift mener vi det er nødvendig å maksimere potensialet til batteripakken, og både levetid og C-rate er derfor justert til å være optimalt for rutene i Trøndelag.

I tillegg til batterier trenger en elektrisk båt flere komponenter for å gjøre elektrisk strøm om til nyttig arbeid. Prosjekteringen av kraftforsyningssystemet i dette prosjektet er basert på Westcon Power & Automation sin plattform for nullutslippsfartøy kalt «e-SEAMatic Blue». Denne plattformen tilbyr en rekke produkter innen både kraftelektronikk og elektriske motorer. Målet var å finne produkter med lav vekt og høy energieffektivitet, samtidig som sikkerhet, og funksjonalitet var passende for en passasjerhurtigbåt. Westcon Power & Automation er et av få selskaper i verden som har allerede har praktisk erfaring med levering av komponenter til elektriske sightseeing fartøy. De var systemintegrator for det prisvinnende skipet Future of the Fjords, og har også levert komponenter til flere elektriske ferger.

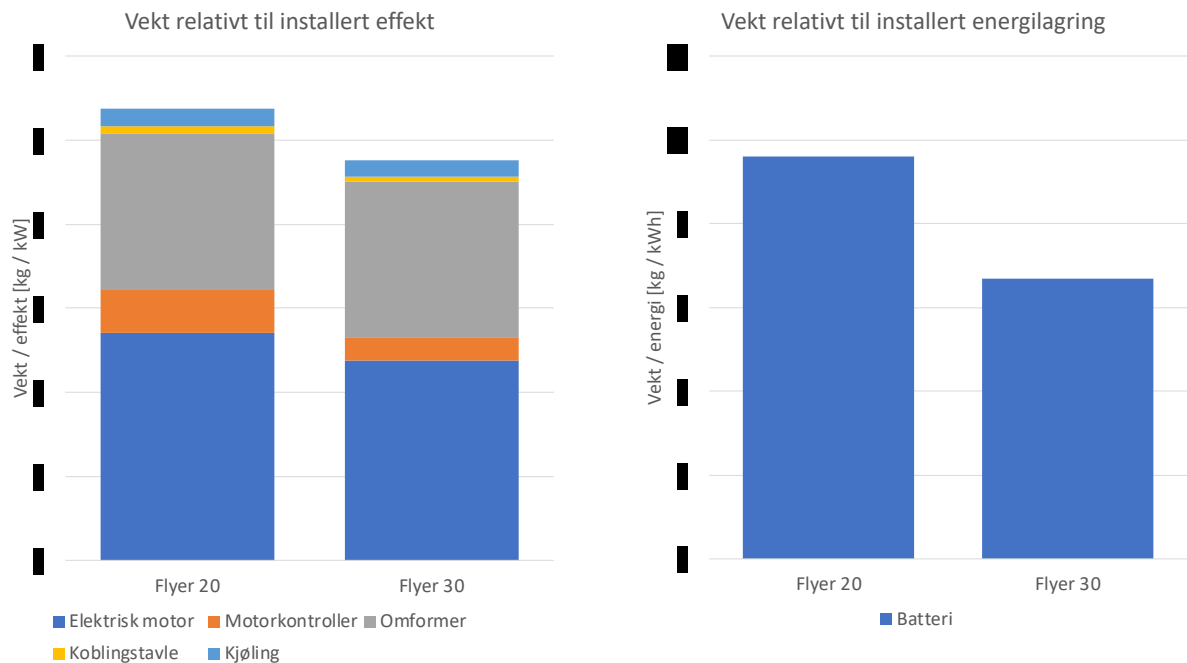
Komponenter som trengs i en batterielektrisk hurtigbåt er listet opp i tabellen under. Prosjekteringen av systemet ble først gjennomført ved at omtrentlige tall på vekt som funksjon av effekt og energilagring ble brukt til å estimere det totale effektbehovet og energilagringsbehovet for både Flyer 30 og flyer 20. Deretter ble spesifikke komponenter valgt ut for de respektive båtene, og dimensjoneringen av systemet ble oppdatert med faktiske tall.

Komponentnavn	Bilde	Forklaring
Batteripakke		Batterier lagrer selve energien og leverer energien som DC strøm. Mange celler kobles sammen i moduler, og flere moduler kobles sammen til en komplett batteripakke. Spenningen til en maritim batteripakke rundt 1000 VDC. Batteripakken inkluderer overvåkning av individuelle celler og cellebalansering for å unngå og eventuelt varsle om farlige situasjoner.
e-SEA Koblingstavler		Koblingstavler sender strømmen fra batteriene videre til forskjellige komponenter. Koblingstavler fra Westcon er bygd etter maritime standarder

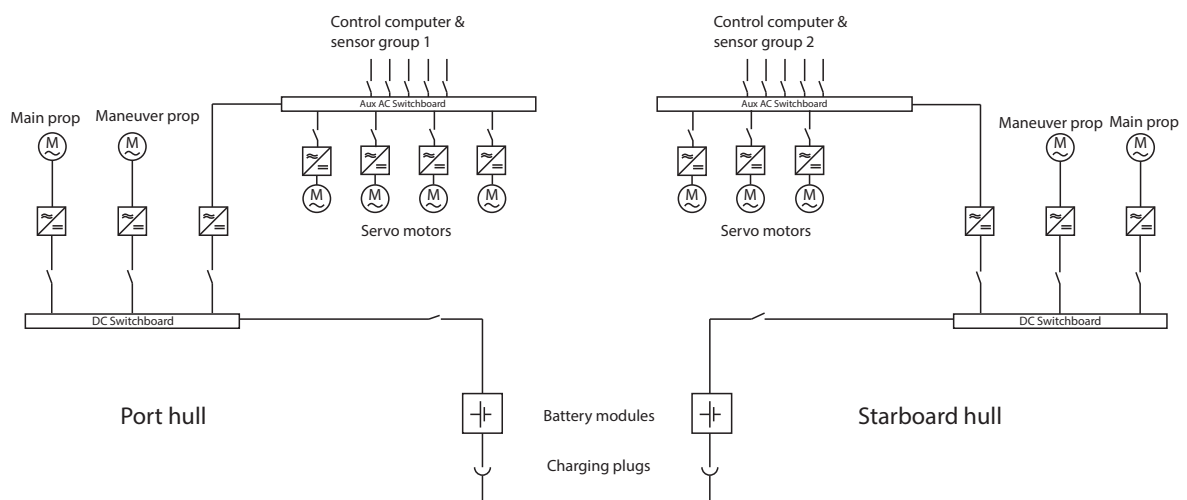
e-SEA Omformer		For å kunne utnytte strømmen fra batteriet i forskjellige komponenter blir 1000 VDC omformet til 400 VAC. Dette skjer ved hjelp av omformere.
e-SEA Drive		For å kontrollere hastighet og moment fra en elektrisk motor trengs det en motorkontroller. Westcon leverer lette komponenter etter maritime standarder
e-SEA elektrisk induksjonsmotor		Propulsjonen skjer ved hjelp av totalt 2 elektriske motorer på hovedvannjetten og 1 motor for hver manøvreringsjet. De elektriske motorene benyttet i dette prosjektet er vannkjølte maritime induksjonsmotorer.
Cavotec Socket for lading		For å kunne koble batteriene til landstrøm for lading trengs det ladeplugger. Totalt 2 ladeplugger blir brukt for å kunne lade batteripakkene i hvert skrog
Kjøling (bilde kun for illustrasjon)		Elektrisk kraftforsyning er langt mer energieffektiv enn fosilbasert kraftforsyning. Likevel er det viktig å holde kontroll på temperaturen i batterirommene. Dette gjøres ved å benytte ventilasjonsanlegg.

For hver av komponentene i dette systemet er det litt energitap. Elektriske motorer har virkningsgrad mellom 95-98%, mens spenningsomformere, tavler og motorkontrollere har virkningsgrad i nærheten av 99% og over [38]. Vi har antatt at ca. 5% av energien fra batteriet blir tapt i det elektriske systemet før den blir konvertert til nyttigarbeid, som gir en elektrisk virkningsgrad på 95%.

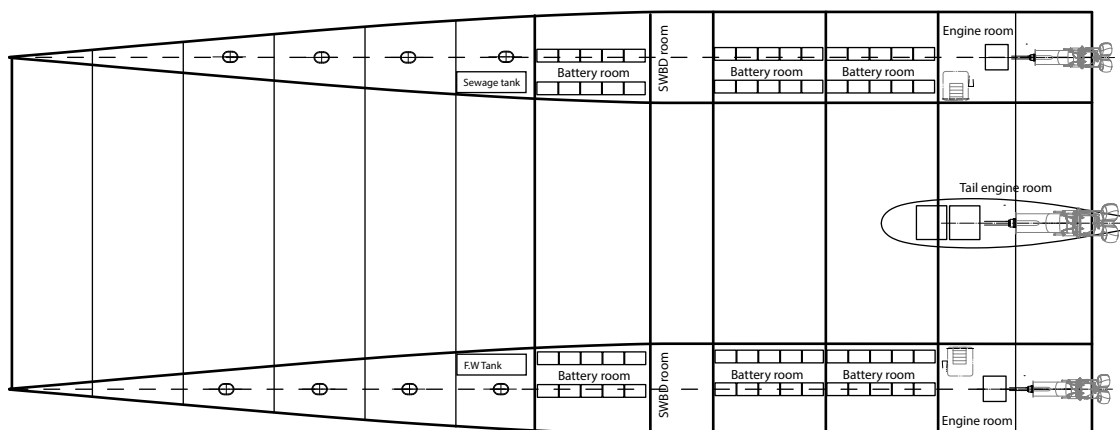
Vekten av de forskjellige komponentene blir presentert som forholdstall mellom vekt og effekt og vekt og lagret energi. Disse tallene blir videre brukt i dimensjoneringsberegningene av kraftforsyningssystemet som kommer senere i dette kapittelet. Forholdstallet presentert i figuren er regnet ut fra de endelige komponentene dimensjonert for rett effekt og energilagring. Flyer 20 har et tyngre batteri enn Flyer 30 ettersom Flyer 20 er prosjektert med høyere relativ ladeeffekt (C-rate på 3 for Flyer 20 mot C-rate på 1,3 for Flyer 30). I tillegg er vekten av motor og motorkontroller relativt sett litt lettere for Flyer 30 enn for Flyer 20. Forholdet mellom vekt og effekt er altså ikke helt uavhengig av effektmengde, men det er ikke langt unna.



Måten disse komponentene er koblet sammen på er vist i diagrammet under. Hvert skrog inneholder hver sine batteripakker, koblingstavler, omformere og motorkontrollere. Ingen komponenter i styrbord skrog er koblet på noen av komponentene i babord skrog og omvendt. Dette gjør at skipet i praksis består av to helt uavhengige kraftsystem, og feil på et kraftsystem kan ikke påvirke det andre.



Plasseringen av alle komponentene er under hoveddekket. Motorer til hovedvannjetten er plassert i halen til skipet, mens resten av komponentene er plassert skrogene. Dekksplan som viser plassering av alle komponenter er vist i figuren under. Alle batterirom, koblingsrom og motorrom er brannisolert på samme måte som vanlige maskinrom ombord i en hurtigbåt etter krav fra klasseselskap. Generell deksplan er lik for Flyer 30 og Flyer 20 med unntak av antall batteripakker og størrelse på komponenter.



Hydrogen

Mens bruken av batterier har økt kraftig de siste årene innen alt fra sparkesykler til ferger har bruken av hydrogen vært relativt beskjeden. I 2018 var det 195 351 batteridrevne personbiler i Norge, mens kategorien «hydrogen og parafinbiler» teller kun 417 [39]. Det vil si at maks 0,2% av alle nullutslippsbilene i Norge er basert på hydrogen som energilagring (avhengig av hvor mange som går på parafin). Likevel kan hydrogen ha en fremtid som energilagring for flere typer fremkomstmidler. Eksempler inkluderer lastebiler [40], tog [41], cruisebåter [42] og hurtigbåter [43]. Hovedargumentet er at hydrogen kan bidra med rekkevidde langt utover hva som er mulig med batteridrift, og at hydrogen derfor kan finne sitt marked i fremkomstmidler med behov for store mengder energi. Vårt utgangspunkt i starten av dette prosjektet var at den lengste ruten, Trondheim – Kristiansund, var så lang og så energikrevende at hydrogen var den eneste løsningen. Vi samlet derfor inn data på hydrogensystemer for å estimere vekt, energiforbruk og kostander, på samme måte som vi gjorde for batteri. To ting ble klart relativt tidlig i prosjektet: hydrogen er lettere enn batterier for lange ruter, men forskjellen er ikke så stor som vi i utgangspunktet trodde. I tillegg er kostandene knyttet til hydrogen store relativt til batteri, som vi kommer tilbake til i økonomikapittelet. Med energieffektive hydrofoiler, økt hastighet, og korte ladestopp på veien, mener vi at batteri er den beste løsningen for alle rutene i Trøndelag.

Denne seksjonen presenterer dataene vi hentet inn for hydrogensystemer for hurtigbåtdrift. Bruken av disse dataene er utelukkende ment som sammenlikningsgrunnlag for å forklare hvorfor vi har gått for en batteriløsning. Av den grunn har vi ikke detaljprosjektert hydrogensystemet. For en gjennomgang av dette anbefaler rapporten til det Brødrene Aa ledede konsortiet som handler om konvensjonelle hydrogenbåter og hvor slike detaljer har større fokus.

Vekt av hydrogenbasert kraftforsyning

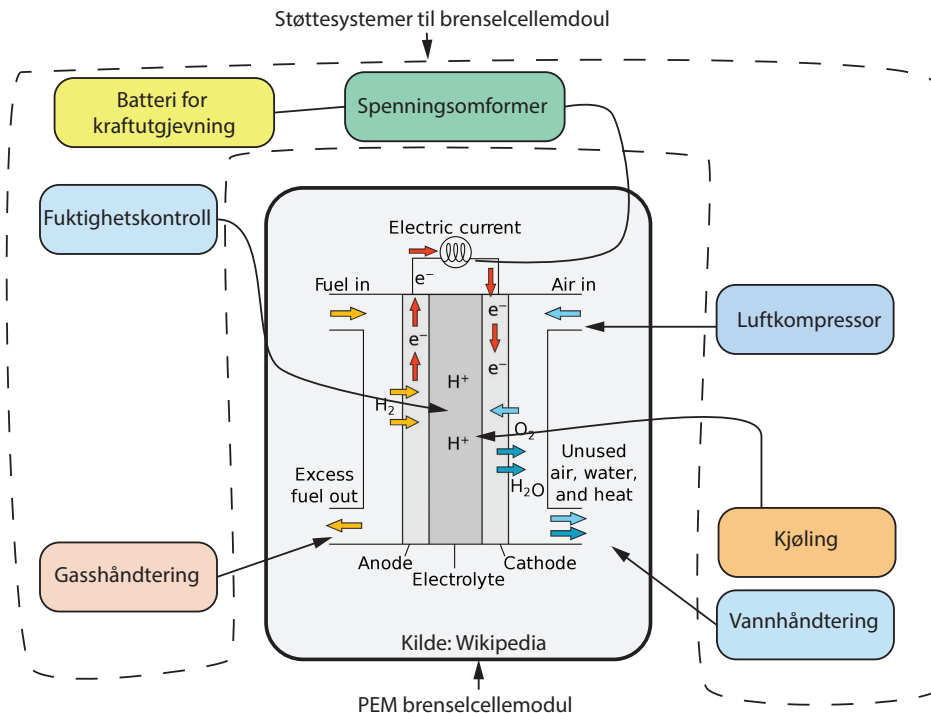
Vurderingen av hydrogen som energikilde ble først og fremst gjort ved å samle inn data fra underleverandører i hydrogenindustrien. Det er svært mange likheter mellom kraftsystemet til en batteribåt og en hydrogenbåt. Hovedforskjellen ligger i at selve batteripakken er byttet ut med brenselceller og hydrogentanker. På tross av at hydrogen (foreløpig) er lite utbredt som energikilde finnes det flere selskaper som produserer både brenselceller og hydrogentanker og som har en aktiv satsing inn mot det maritime markedet. I tabellen under har vi listet opp alle selskapene vi har hentet inn data fra.

Tabell 5: Hydrogenprodusenter

Selskap	Nasjonalitet	Referanseprosjekter
 POWERCELL	Svensk	• Produsent av brenselceller • Utvikler et system for forskningsskipet Aranda (200 kW) • 28 systemer solgt til Wuhan Tiger, kinesisk hydrogenbussprodusent • En lastebil i drift for Coop i Sveits.
 BALLARD®	Canada	• Produsent av brenselceller • 100 busser, 12 mill. km over 10 år • 2700 backupkraftsystemer for telekommunikasjonsnett • >= 60 MUSD utviklingskontrakt med Volkswagen • HySeas III: Bil- og passasjerferge planlagt bygget i 2021.
 PM PROTON MOTOR Fuel Cells · Power Systems	Tyskland	• Produsent av brenselceller • FCS Alterwasser.100 pax, 100 kW, GL-godkjent, 2008 • 3-10 kW systemer for backupelektrisitet i hus og lokale kraftnett • Én bil er produsert som et forskningsprosjekt
 HYDROGENICS	Canada	• Produsent av brenselceller • 14 hydrogentog • 30 busser • Del av prosjektet Water-Go-Round, som sikter på å ha en hydrogendrevet passasjerkatamaran i drift i 2019
 HEXAGON COMPOSITES	Norge	• Produsent av gass- og hydrogentanker • Del av prosjektet Water-Go-Round, som sikter på å ha en hydrogendrevet passasjerkatamaran i drift i 2019 • Masseproduksjon av tanker for veitransport av gass, og drivstofftanker til busser og lastebiler
 UMOE ADVANCED COMPOSITES	Norge	• Produsent av gass- og hydrogentanker • CNG-tanker til fergen Texelstroom • Leverer transporttanker for hydrogen til Uno-X/NEL, AGA og Hydrogenics

Samtlige produsenter av brenselceller produserer en type brenselcelle kalt Proton Exchange Membrane (PEM) [44]. Denne typen er spesielt egnet til transportapplikasjoner på grunn av lav vekt relativt til mange andre typer brenselceller. Begge de to tankprodusentene vi har vurdert lager komposittanker. Det er også mulig å kjøpe gasstanker i metall, men dette har ikke blitt vurdert på grunn av vektproblematikk.

Brenselcelle trenger flere støttesystemer enn en batteripakke. Et diagram av en typisk PEM-celle pluss et sett med støttesystemer er vist i figuren under.



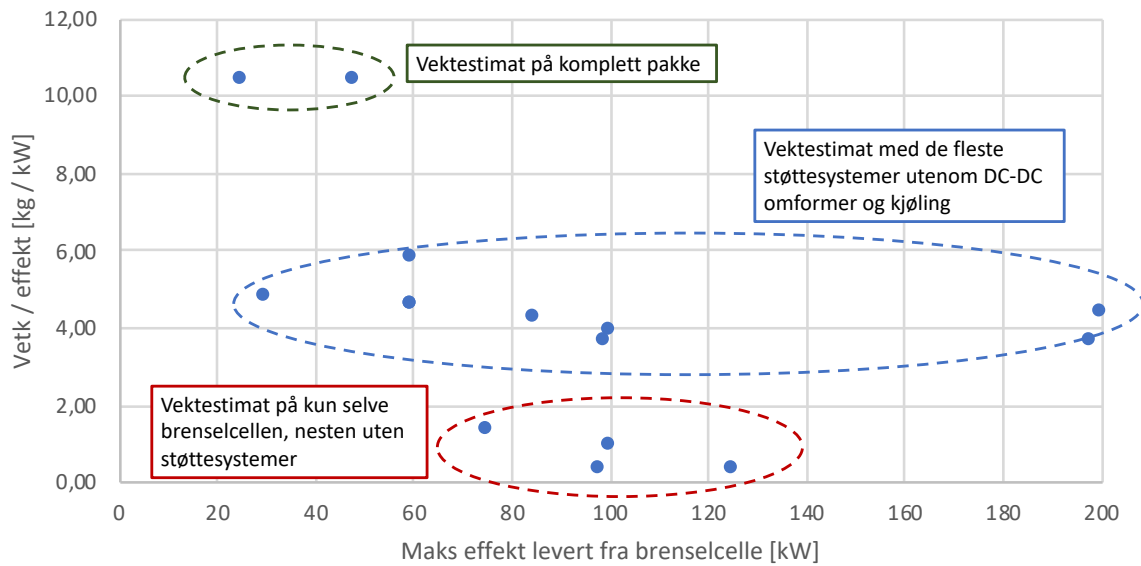
Figur 68: Brenselcellesystem med støttesystemer

I prinsipp er selve brenselcellen kun den delen som tar imot hydrogen og oksygen og konverterer det til strøm. For at dette skal fungere må både luft og hydrogen komme inn med rett trykk. Til dette trengs det luftkompressorer og trykkregulering av hydrogengassen. Brenselcellen må operere på rett temperatur, samtidig som brenselcellen i seg selv avgir store mengder med varme. Dette fører til at kjølesystemer er en kritisk del av brenselcellesystemet. Resultatet av reaksjonene mellom hydrogen og oksygen er vann. Dette vannet må transporteres vekk fra selve cellen og i tillegg må fuktigheten inne i cellen holdes under kontroll. En brenselcelle leverer strøm med lav spenning. For at denne strømmen skal kunne gjøre nyttig arbeid i resten av kraftforsyningsystemet må spenningen økes ved hjelp av en spenningsomformer. Dette er annerledes enn batterier, hvor spenningen fra batteriet kan reguleres direkte ved å koble dem i enten serie eller parallell etter behov. Selv om energien til en hydrogenbåt skal lagres i gasstanker er det fortsatt behov for batterier i kraftsystemet. Brenselceller lever lengre om de kan operere med jevn belastning. Ved normal drift av en hurtigbåt kan det være hensiktsmessig og ikke skru av brenselcellen mellom hver avgang, men la de produsere samme mengde strøm kontinuerlig. Derfor brukes batterier for å håndtere midlertidige effektvariasjoner.

Når man får oppgitt tall på vekt av et brenselcellesystem er stor forskjell på hvor mange av disse støttesystemene som er tatt med i beregningen. Noen produsenter selger kun selve brenselcellen, uten noen form for støttesystemer. Vekten av en PEM celle kan ofte være under 10% av totalvekta til hele brenselcellesystemet. Andre produsenter selger pakker med de fleste støttesystemene inkludert med unntak av spenningsomformer, kjøling og batteripakker. Noen av produsentene har erfaring med prosjektering av komplette system og kan dele informasjon om både vekt og pris på totalpakker ved forespørsel.

For å vise variasjonen i vektdata har vi plotet estimater vi har mottatt fra produsenter av brenselceller. Plottet viser at «vekt av en brenselcelle» kan variere med en faktor på 10, avhengig av hvor stor del av totalsystemet som er med i vektestimatet.

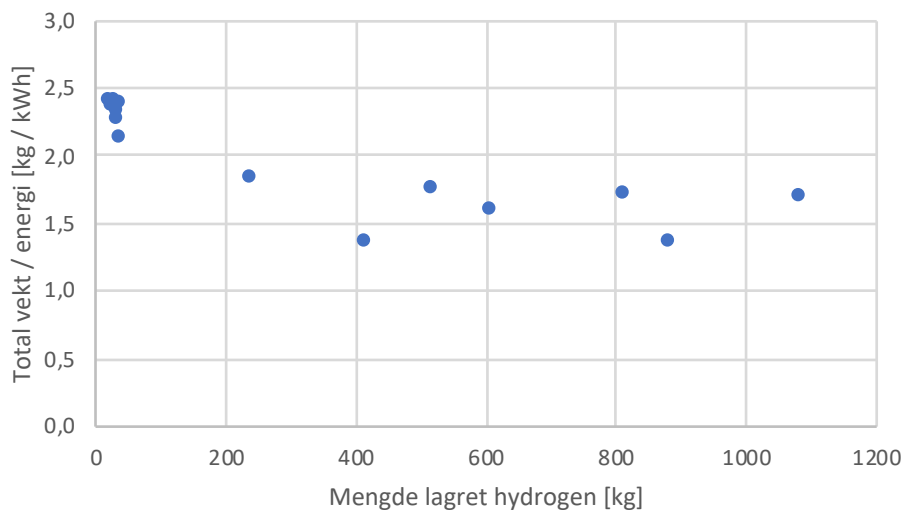
Effekt vs vekt brenselcelle



Virkningsgraden til en brenselcelle varierer med belastning, men kan komme opp i 50-60% under ideelle forhold. I dette prosjektet har vi antatt 50% virkningsgrad for brenselcellen. I løpet av levetiden til brenselcellen vil virkningsgraden reduseres.

Vekt av hydrogentanker er også estimert ved å benytte data fra produsentene i Tabell 5. I figuren under har vi plottet vekt / lagret mengde energi i tanker fra både Hexagon Composites og Umoe Advanced Composites. Spesifikasjonene på tankene er oppgitt ved hvor mange kg hydrogen en tank kan lagre ved designtrykk, som er mellom 200 – 350 bar. En reaksjon mellom hydrogen og oksygen kan utløse omtrent 33,3 kWh / kg hydrogen man putter inn i prosessen. Mengden nyttig energi i en hydrogentank er regnet ut fra dette forholdet, pluss antatt virkningsgrad på brenselcellen på 50%. Tallene for vekt / mengde energi i figuren under gjelder altså for mengden energi ut av brenselcellen, etter at 50% av den opprinnelige energien i hydrogenet er konvertert til varme.

Vekt hydrogentanker

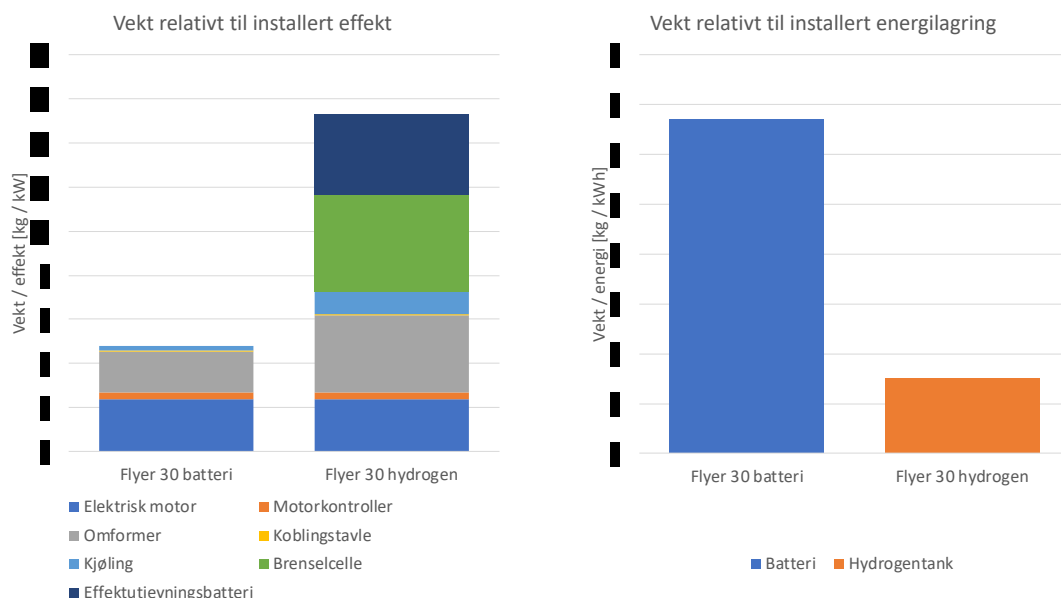


Figur 69: Vekt av hydrogentanker relativt til mengden nyttig energi de inneholder

Hydrogensystemet beregnet i dette prosjektet

De endelige tallene for et hydrogenbasert energilagringssystem ble utarbeidet av Westcon Power & Automation i samarbeid med brenselcelle leverandøren Ballard. Et komplett tilbud ble laget basert på Ballard sin brenselcellemodul, som inneholder det meste av støttesystemer med unntak av kjøling, DC-DC omformer og batteripakke for effektutjevning. Dette ble kombinert med Westcon sin e-SEAMatic plattform, på samme måte som for batteriskipene. Motorer, motorkontrollere og koblingstavler kan være identisk for en hydrogenbåt og en batteribåt. I figuren under har vi plottet vekt / effekt og vekt / lagret energi, oppdelt på forskjellige komponenter for en hydrogenbåt og sammenliknet det med tilsvarende verdier for batterisystemet. Det er primært fem ting som varierer i kraftsystemet relativt til et batterielektrisk kraftforsyningssystem:

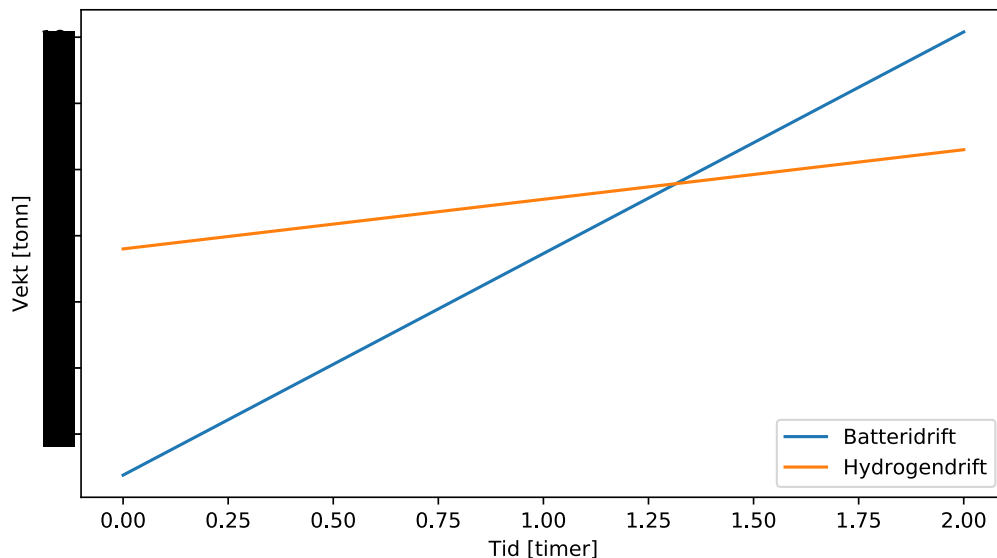
- Vekta av omformeren for kraftsystemet har økt betraktelig. Dette kommer av at omformeren ikke lenger bare omdanner likestrøm til vekselstrøm, det må nå også inn komponenter for å omforme spenningen fra brenselcellene.
- Kjøleanlegget har økt betraktelig i vekt, da det nå er betydelig mer varme som må fjernes fra maskinrommet.
- Brenselcelleanlegget i seg selv bidrar med kraftig økt vekt per mengde installert effekt. Selve brenselcellemodulen fra Ballard er mer enn dobbelt så tung som de elektriske motorene.
- En batteripakke for utjevning av effektvariasjoner bidrar med stor økning i vekt per effekt. Batteripakken er dimensjonert til å kunne absorbere effekten fra brenselcellen i maks 15 minutter hvis man starter med tomt batteri. Dette tilsvarer at batteriet må ha en C-rate for lading på ca. 4, noe som fører til at batteriet blir relativt tungt per mengde energi, totalt 14,7 kg / kWh. Ettersom denne batteripakken dimensjoneres som funksjon av effekten til brenselcelleanlegget er vekta omregnet til vekt / effekt
- Hydrogentankene veier omtrent 22% så mye per installert mengde energi relativt til batteripakken i Flyer 30. Mengden energi man trenger på en gitt rute har dermed betydelig mindre å si for totalvekta av kraftsystemet.



Figur 70: Vekt som funksjon av effekt og energilagring for Flyer 30 med både hydrogen og batteri som energilagringssystem

Basert på disse tallene kan man gjøre et enkelt estimat på når det lønner seg fra et vektperspektiv å bruke hydrogen som energilagring og når det lønner seg å bruke batteri. I praksis er vekten per installerte mengde energi rundt 78% lavere for et hydrogensystem enn det er for et batterisystem. Til gjengjeld er vekten per installerte mengde effekt omtrent 2,4 ganger høyere. Hvis vi for enkelhets skyld antar at effektbehovet til et fartøy er uavhengig av vekt så kan vi regne ut energibehovet til

fartøyet som funksjon av hvor lenge man trenger effekten. En times drift med 1000 kW vil f.eks. føre til behov for 1000 kWh med energi. To timers drift med 1000 kW fører til behov for 2000 kWh med energi, osv. Ved konstant effekt vil vekten av motorer, brenselceller og annet utstyr som skaleres med effekt være konstant. Vekten av utstyr knyttet til energilagring vil skalere med hvor lenge man ønsker å utnytte effekten. Forholdet mellom batteri og hydrogen, som funksjon av tid er plottet i figuren under. **Med tallene vi har utarbeidet i dette prosjektet så vil batteridrift være lettere enn hydrogendrift for alle ruter under ca. 80 min. Hvis ladestoppene kan komme med under 80 minutters mellomrom, så vil batteriløsningen være den letteste løsningen.**



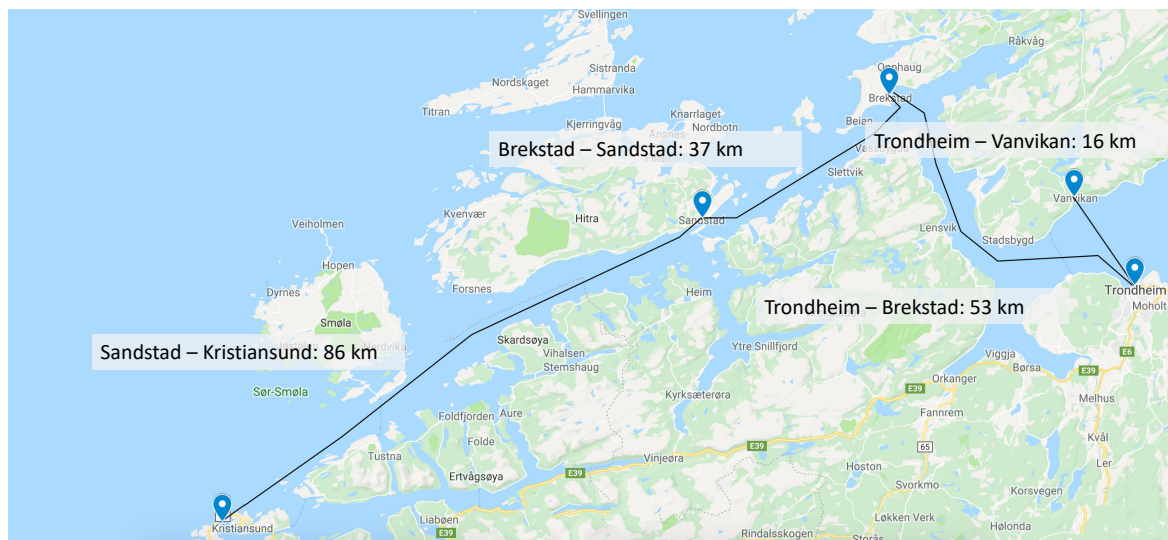
Figur 71: Vekt av kraftforsyningssystem ved 1000 kW effekt som funksjon av dimensjonerende tid

Dimensjonering av kraftsystem

Dimensjoneringen av kraftsystemet ombord i båten er en kobling av hydrodynamisk analyse og prosjektering av kraftsystem. Bakgrunnen for dette er at vekt og energiforbruk henger tett sammen, samtidig som utstyr knyttet til både batteridrift og hydrogendrift har stor vekt. Kraftforsyningen ender dermed opp med å være kilden til en betydelig del av det totale energiforbruket til en nullutslippshurtigbåt. I denne seksjonen forklarer vi hvordan vi har dimensjonert kraftsystemet for de spesifikke rutene i dette prosjektet.

Rutedata

Rutene som vi har sett på dette prosjektet er vist i figuren under. Totalt 3 ruter ble analysert. Flyer 30 er dimensjonert for å operere på rutene Trondheim – Brekstad og Trondheim – Kristiansund mens Flyer 20 er dimensjonert for å operere på ruta Trondheim – Vanvikan.



Rute 810 Trondheim – Vanvikan er en rute med hyppige avganger, men hvor distansen ved hver overfart er kort, kun 16 km hver vei. Totalt er det rundt 13 overfarter tur/retur på ruta i løpet av en hverdag, og 81 turer i løpet av en uke. Under rushtrafikken på morgenen og ettermiddagen er det omtrent en avgang i timen fra både Trondheim og Vanvikan. Kravet til en hurtigbåt som skal operere denne ruta har derfor vært at turen Trondheim – Vanvikan – Trondheim må kunne gjennomføres innen en time, inkludert av og påstigning av passasjerer og lading av batteripakke. Flyer 20 har en designhastighet på 35 knop – opp fra 25 knop med Trondheimsfjord 2 som operer på ruta i dag - noe som fører til en overfartstid på 15 min. I løpet av en tur-retur er det da 30 min med overfart, og totalt 30 min igjen som kan brukes til lading av batterier. Vi har valgt en relativt tung batteripakke, med mulighet for høy ladeeffekt for å kunne opprettholde hyppige avganger på denne ruta. Lading av batteriet trenger kun å skje på Trondheimsiden av ruta, og total ladetid etter en tur-retur er beregnet til 15 min.

805 Trondheim – Brekstad har betydelig færre avganger per dag, med kun 4 avganger fra Trondheim per dag på en vanlig hverdag, og kun 23 overfarter tur-retur i løpet av en uke. Distansen en vei er rundt 53 km, som gir totalt 106 km tur-retur. På hver tur ligger båten kun i kort tid på Brekstad – rundt 10 min – før den returnerer til Trondheim. Mellom hver avgang fra Trondheim er det rundt 2 timer på en vanlig hverdag. Årsaken er i stor grad at denne strekningen også betjenes av ruta Trondheim – Kristiansund. For å opprettholde dagens rutetilbud må hurtigbåten kunne greie seg med relativt kort ladetid på Brekstad, mens det er lengre ladetid i Trondheim. Samtidig er det ønskelig at samme type båt kan operere på både Trondheim – Brekstad og Trondheim – Kristiansund. Strekket Trondheim – Kristiansund endte opp med å bli den utfordrende delen av dette prosjektet, og en båt som er dimensjonert for å betjene dette strekket tilfredsstiller automatisk kravene på ruta Trondheim – Brekstad. Vi har antatt kun et adestopp på 10 minutter ved hver ankomst på Brekstad, mens det er mulighet for et lengre ladestopp i Trondheim på 30 minutter mellom hver avgang.

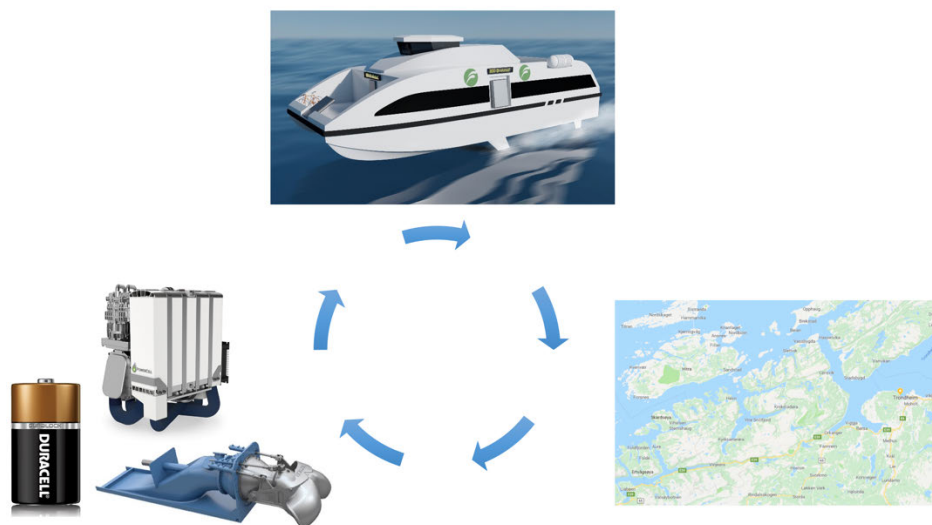
800 Trondheim – Kristiansund er hovedutfordringen i dette prosjektet. En tur er på totalt 176 km, med stopp innom Brekstad, Sandstad og flere mindre plasser på veien. Antall turer er tilsvarende som i ruten 805 Trondheim – Brekstad. På hver ende av ruta ligger båten til kai i rundt en halv time. For å opprettholde dagens rutetilbud må batterilading kunne skje innen en halv time, og distansen på 176 km må kunne gjennomføres innenfor samme tidsbruk som i dag. Vi har løst dette ved å øke hastigheten fra dagens 33 knop til 40 knop som sparer inn en halv time på overfarten. Denne halvtimen benyttes til 15 min mellomading ved stopp på både Brekstad og Sandstad. Den totale tidsbruken på ruta kan dermed opprettholdes, samtidig som vi muliggjør kostnadseffektiv batteridrift selv på en rute som er 176 km lang.

Jo flere plasser man kan lade en batteribåt, jo lettere er det å få til batteridrift. Samtidig er det begrensninger i strømnettet og store kostander knyttet til ladeinfrastruktur som gjør at det ikke er ønskelig med flere ladestasjoner enn nødvendig. I dette prosjektet har vi antatt at Trondheim, Brekstad, Sandstad og Kristiansund får utbygd ladeinfrastruktur med tilstrekkelig kapasitet tilsvarende hva som trengs for Flyer 20 og Flyer 30. For Vanvikan har vi ikke beregnet inn ladeinfrastruktur. Årsaken er at det er relativt lett å gå tur-retur på en batteriladning, da strekket mellom Trondheim og Vanvikan er såpass kort. Hvorvidt det er hensiktsmessig å bygge ladeinfrastruktur på Vanvikan likevel, for å kunne benytte lettere batterier eller øke sikkerheten har vi ikke tatt stilling til i dette prosjektet. Vi konkluderer med at det ikke er nødvendig. De andre ladestasjonene er regnet som nødvendig for å muliggjøre batteridrift.

Forklaring av beregninger

For å gjennomføre dimensjonering av kraftforsyningssystemet ombord i båtene for dette prosjektet benytter vi en iterativ modell. En av de viktigste prinsippene i disse beregningene er sammenhengen mellom vekt og motstand. Som nevnt tidligere i denne rapporten er motstand nesten direkte proporsjonalt med totalvekta av en hurtigbåt. Dette gjelder både for konvensjonelle skrog og hydrofoiler, gitt at man designer dem for rett vekt. Hvis man benytter et konvensjonelt skrog så vil deplasementet til skroget økes sammen med vekt ved at båten flyter dypere. Basert på CFD-simuleringer av konvensjonelle skrog vet vi at økningen i dypgang fører til økt motstand som er omtrent proporsjonal med økt vekt. Dette har vært observert for vidt forskjellige skroggeometrier, både konvensjonelle hurtigbåter og hurtiggående yachter. Et hydrofoilfartøy vil alltid være mest energieffektivt om hydrofoilsystemet er tilpasset designvekta av skipet. Hvis man skalerer arealet av hydrofoilsystemet direkte med økt vekt, men holder alle andre designvariabler konstant, vil forholdet mellom vekt og motstand holdes noenlunde likt.

Vi starter prosessen med å estimerer hva totalvekta av fartøyet vil bli. Deretter designer vi et hydrofoilsystem for denne vekt, og måler motstanden på hydrofoilsystemet ved hjelp av simuleringer. Med nøyaktige tall for motstanden på det gitte designet gjør vi en ny dimensjonering av kraftsystemet hvor vi antar at motstand og vekt er proporsjonale. Hvis vi ikke har estimert rett vekt i første omgang vil dette potensielt føre til en annen vekt enn hva hydrofoilsystemet er designet for. Derfor lager vi nye design av hydrofoilsystemet, og nye iterative dimensjoneringsprosesser av kraftsystemet, helt frem til estimert vekt stemmer overens med designvekten til hydrofoildesignet. Som regel trengs kun et par iterasjoner før designvekt og estimert vekt er like.



Figur 72: Dimensjonering av utstyr skjer via en iterativ prosess

Dimensjonering av energilagring skjer primært ved å måle nødvendig energiforbruk på ruta i designhastighet, med fullastet båt. Kun en begrenset del av batteriet brukes på hver tur, regulert ved hjelp av design- «Depth of Discharge» (DoD). I en eventuell nødsituasjon vil batteripakken ha stor ekstrakapasitet tilgjengelig. Årsaken til at denne ekstrakapasiteten ikke brukes under normal drift er kun for å øke levetiden på batteriet. Batterier som er dimensjonert for lang levetid har dermed automatisk sikkerhetsmargin i mengden energi ombord for nødsituasjoner. Ettersom hurtigbåter har et høyt energiforbruk i designhastighet er det relativt sett lite energi som går med til manøvrering, oppvarming, lys og andre kilder. Dette har derfor blitt modellert på en enkel måte i dette prosjektet, ved å legge til en sikkerhetsfaktor på energiforbruk estimatet på 5%.

Vekttall for energilagring, motorer og kraftelektronikk er som presentert tidligere i dette kapittelet for både hydrogen og batteri. Alle komponenter i kraftforsyningen skaleres enten med effekt eller mengde energi lagret ombord i båten. Motstand for både Flyer 30, Flyer 20 og sammenlikningstall for konvensjonelle båter er som presentert i kapitelet om Vingedesign, tidligere i denne rapporten. Propulsjonssystem og virkningsgrad er estimert i propulsjonskapittelet. En oppsummering av antagelsene for energiberegningene er listet opp i tabellen under. I denne tabellen er «konvensjonell 25» og «konvensjonell 40» estimatet for hvordan situasjonen ville vært om dagens båter, Trondheimsfjord 2 og MS Terningen/Tyrhaug, ble konvertert til nullutslippsfartøy, med samme dimensjoneringsmetode som vi har brukt på Flyer 20 og Flyer 30 i dette prosjektet. Verdiene for Flyer 20 og Flyer 30 er basert på siste iterasjon av designet. Antall passasjerer og annen nyttelast er antatt identisk for de fire fartøyene.

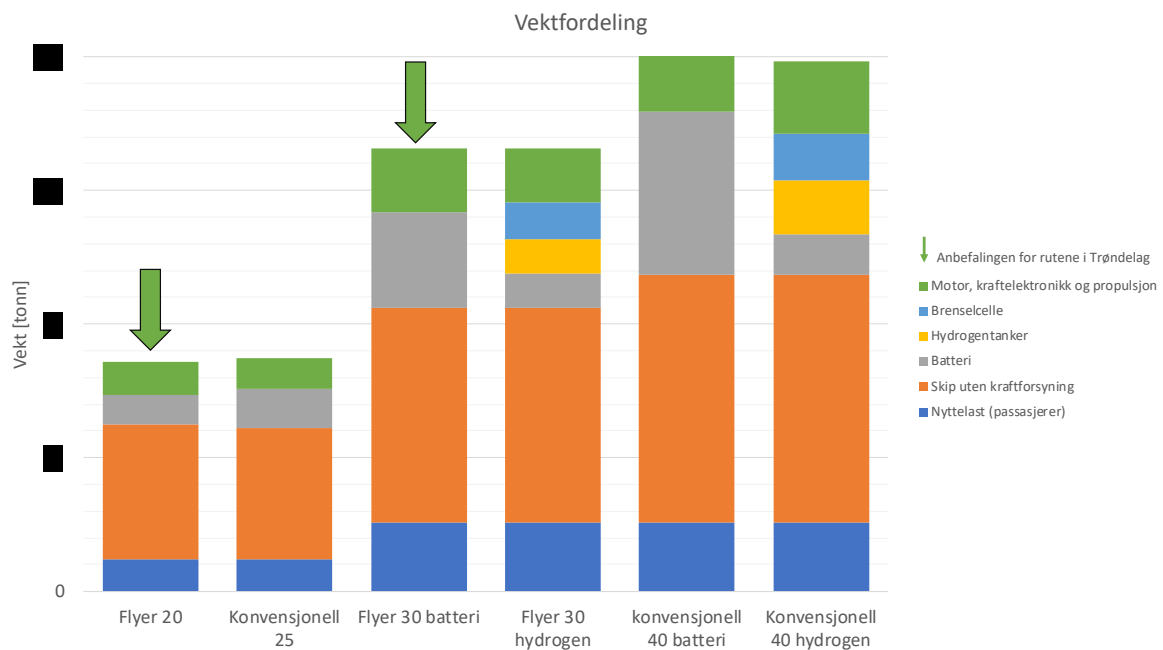
Variabel	Flyer 20	Konvensjonell 25	Flyer 30	Konvensjonell 40
Designhastighet	35 knop	25 knop	40 knop	33 knop
Dimensjonerende lengde	35 km	35 km	90 km	90 km
Vekt / motstand				
Propulsjonsvirkningsgrad				
Elektrisk virkningsgrad	95%	95%	95%	95%
Totalvirkningsgrad				
Belastning av kraftsystemet i marsjfart	90%	90%	90%	90%
Mengden energi brukt på dimensjonerende lengde	64%	64%	64%	64%
Vekt uten kraftforsyningssystemet (startvekt for iterering som inkluderer skrog, overbygg, passasjerer osv)				

Resultater

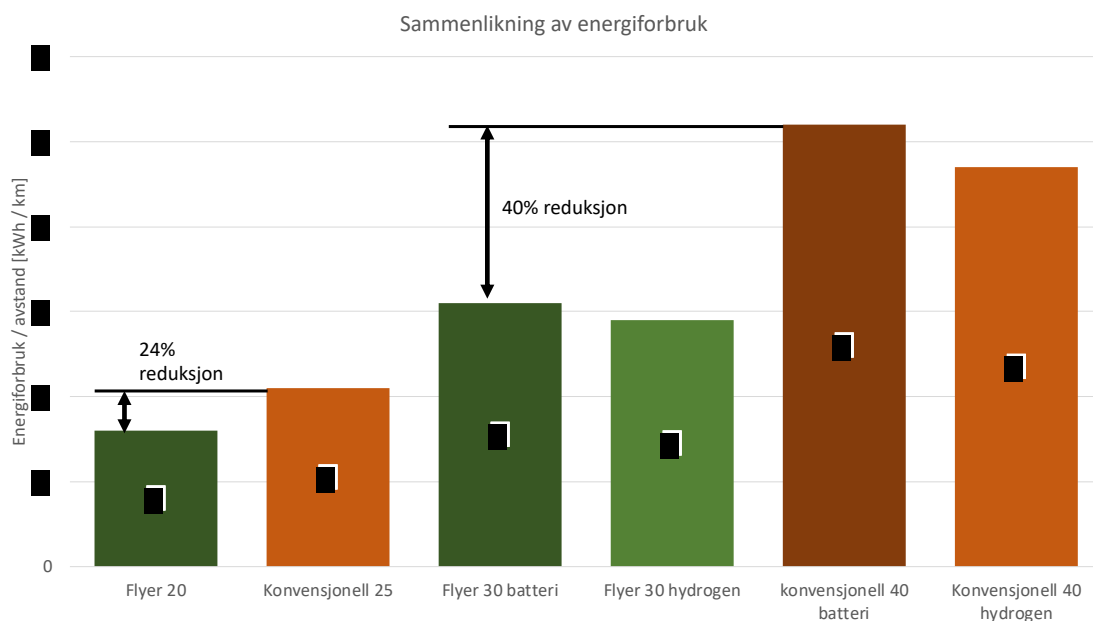
Resultatene fra dimensjoneringen er presentert på 3 forskjellige måter.

Den første viser beregnet total fullastet skipsvekt fordelt på forskjellige hovedkategorier for de forskjellige fartøyene. Flyer 30 og konvensjonell 40 er vist med både batteri og hydrogen som energilagring, mens Flyer 20 og konvensjonell 25 kun er vist med batteri som alternativ. Det er batteridrift som er vår anbefaling fra dette prosjektet på alle rutene, men hydrogendrift vises som sammenlikningsgrunnlag. Det er spesielt en ting å merke seg med denne figuren. Rekkevidden til Flyer 30 er tilstrekkelig til å dekke hele rutetilbudet i Trøndelag, med forutsatt ladeinfrastruktur. Sammenlikningsbåten med hydrogen er dimensjonert med samme rekkevidde sånn at sammenlikningen av kraftforsyning er basert på samme kravspesifikasjoner. Forskjellen i vekt mellom hydrogenalternativet og batterialternativet er i denne sammenhengen svært liten, både for en konvensjonell båt og en hydrofoibåt. Hvis man ønsker færre plasser med lade/fyllinfrastruktur

måtte dimensjonerende rekkevidde på disse båtene økes. Dette ville også føre til at hydrogen ville blitt det letteste alternativet. Se egen seksjon om økonomi for forklaring på hvorfor vi ikke anbefaler denne løsningen.

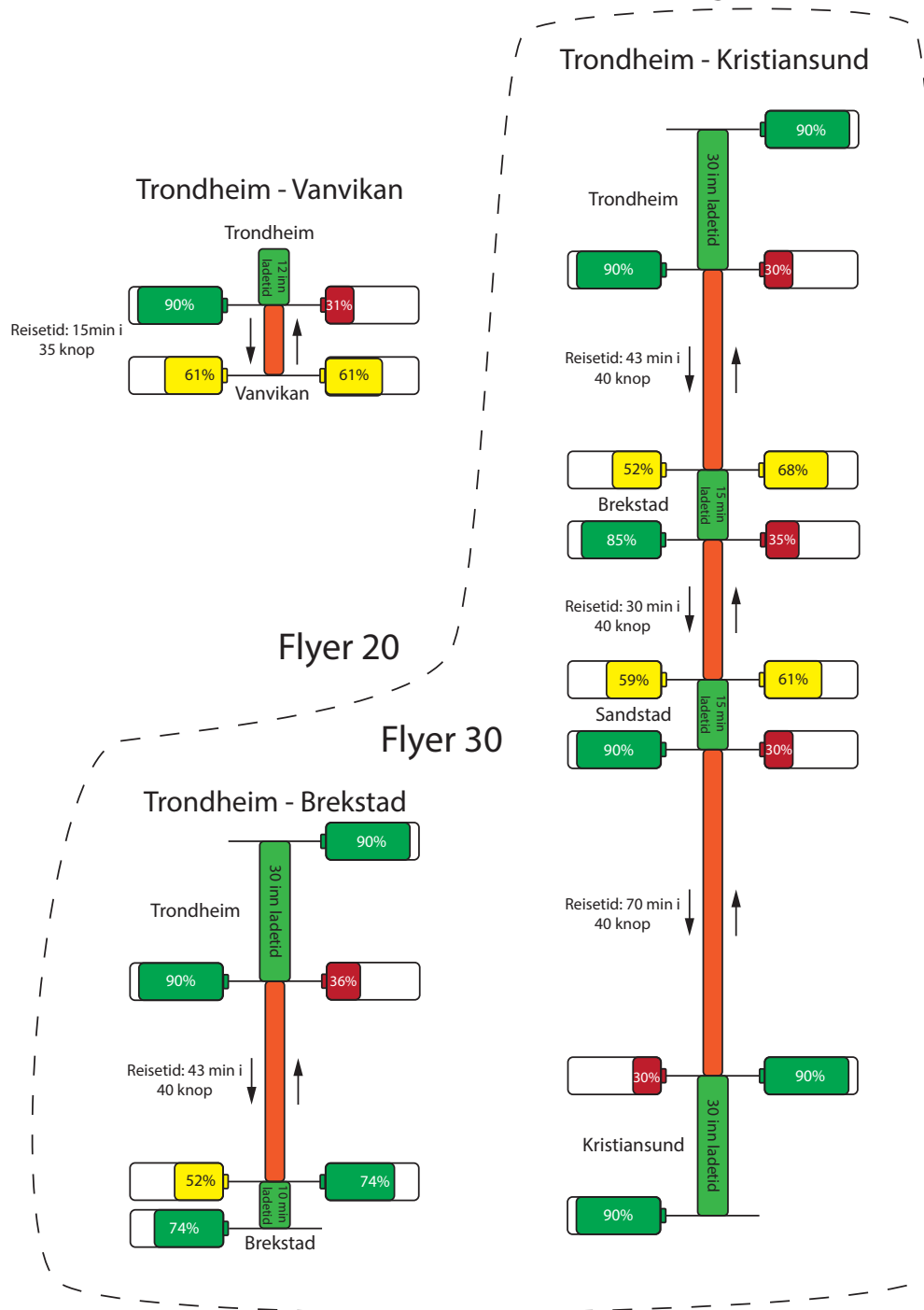


Den neste grafen viser energiforbruk per distanse målt i kWh / km for de forskjellige fartøyene. Energiberegningen viser hva som trengs levert fra batteri / og eller brenselceller, som betyr at virkningsgraden til selve energilagringen ikke er tatt med i figuren under. Dette har stor betydning spesielt for hydrogenalternativet. Ettersom brenselceller har en virkningsgrad på rundt 50% er det reelle energiforbruket rundt dobbelt så høyt. Konsekvensen av dette vil bli videre utforsket i økonomikapitlet. Tallene i figuren under er også bakgrunn for beregninger av driftskostnader på de forskjellige rutene.



Basert på det prosjekterte kraftforsyningssystemet til Flyer 20 og Flyer 30 kan vi analysere hver enkelt rute for å beregne mengde energi i batteriet mellom hvert ladestopp. Dette er gjort i figuren på neste side som viser batteritilstanden på alle rutene, ved Trondheim, Vanvikan, Brekstad, Sandstad og Kristiansund. Figuren illustrerer tidsbruk både til overfart og lading, og viser hvordan 15 min ladestopp på Brekstad og Sandstad muliggjør batteridrift hele veien fra Trondheim til Kristiansund. Ettersom designhastigheten er økt fra 33 knop til 40 knop er den totale tiden brukt på overfarten den samme som før. Vi har antatt at batteriet begynner på 90% kapasitet rutestart. Under normal bruk vil kapasiteten ikke gå under 30%. Selv om startkapasiteten skulle reduseres til 80% vil det være igjen 20% av batteriet til eventuelle nødsituasjoner.

Batteritilstand rutene i Trøndelag



Flere sammenlikninger mellom konvensjonell båt og hydrofoilbåt, samt sammenlikning mellom hydrogen og batteri vil bli gjort i neste kapittel som handler om økonomi. Her vil vi beregne både innkjøpskostnader og driftskostnader for de forskjellige rutene i dette prosjektet. Ettersom alle energilagringalternativene presentert i dette kapitlet kan tilfredsstille krav om null utslipp av klimaskadelige gasser, er det i praksis økonomiske vurderinger som avgjør hvilket alternativ man bør satse på for rutene i Trøndelag. Krav om nullutslipp er fullt mulig å tilfredsstille både med konvensjonelle båter og hydrogen, men det blir betydelig rimeligere om man velger hydrofoilbåter med batteri.

ØKONOMI

Som ved de fleste andre investeringer vil valget om hvorvidt man velger å kreve nullutslippsdrift på hurtigbåter delvis avgjøres av ekstrakostnaden ved å stille et slikt krav. Konsortiet har innhentet priser på ulike typer utstyr som inngår i et nullutslipps kraftsystem, samt estimert prisene på å drifte disse. Vi har så kombinert disse tallene med data om driftstid fra rutetabellene samt resultatene fra rutesimuleringer som gir effektbehovet for hvert fartøy. Til sammen gir dette et bilde av innkjøps- og driftskostnader for energisystemene i hvert fartøy på hver rute.

Alle tall som presenteres i dette kapitlet kommer med en viss grad av usikkerhet, da prisene for batterier og hydrogensystemer er i stadig endring. Vi har lagt vekt på å forklare alle antakelser og datakilder underveis, slik at det er overkommelig for leseren å gjennomføre vurderinger av hvorvidt hver priskomponent stemmer overens med deres egne erfaringer. Av hensyn til konfidensialitet for underleverandører som har oppgitt priser er mange av tallene gitt som gjennomsnittsverdier av flere leverandørers data.

Hva koster en hurtigbåt?

For å ha omtrentlige referansetall å sammenligne de senere presenterte kostnadsestimatene med finner vi det fornuftig å inkludere noen eksempler på typiske priser på hurtigbåter i dag. Disse kan finnes i Tabell 6. Alle tallene er funnet offentlig tilgjengelig på internett. Slike tall er selvsagt avhengige av mange faktorer, blant annet størrelse, hastighet og komfortnivå. Noen eksempler gir likevel en grei indikasjon på størrelsesorden av typiske priser. Det er i denne sammenhengen viktig å huske på at de presenterte tallene inkluderer kraftsystemet. Prisene som kommer senere i kapitlet kommer altså ikke på toppen av eksempelprisene under.

Tabell 6: Typiske priser på hurtigbåter levert de siste årene

Fartøy	Byggeår	Energilagring	Antall passasjerer	Pris
Nordlandsekspressen	2018	Diesel	220	100 MNOK
Vision of The Fjords	2016	Diesel + batteri	400	90 MNOK
Future of The Fjords	2018	Batteri	400	144 MNOK

Datagrunnlag og antakelser

I dette kapitlet forsøker vi etter beste evne å estimere prisen på kraftsystemet for nullutslipps hurtigbåter. Vi velger å utelate kostnaden til skrog, innredning, sikkerhetsutstyr og andre elementer som er like mellom en nullutslippsbåt og en konvensjonell dieseldrevet båt. Kostnadene kan deles i to hovedkategorier – innkjøp og drift. For å gjøre beregningene så enkle og gjennomsiktlige som mulig har vi gjort følgende tre antakelser:

- 1 Hele kraftsystemet skal regnes som en kostnad ved det første anbudet
- 2 Vi regner nåverdien av fremtidige driftsutgifter som identisk med fremtidig beløp
- 3 Driftstid på et anbud er åtte år

Med disse antakelsene er det enkelt for leseren å skalere tallene til egne anbudsperioder eller alternative innkjøpsmodeller.

Innkjøpskostnader

Komponenter som regnes som en del av innkjøpskostnadene – eller CAPEX om man vil – listet opp under. Vi gir deretter en beskrivelse av datagrunnlag og antakelser for hver komponenttype.

- Batterisystem
- Brenselcelleanlegg
- Hydrogentanker
- Kraftelektronikk
- Hydrofoilsystem

Batterisystem

Batteriteknologi utvikler seg raskt, og en av faktorene som endrer seg raskest er pris. Figur 73 viser gjennomsnittlig pris for litium-ion batterier fra 2010 og frem til i dag. Disse tallene er basert på en spørreundersøkelse gjort av Bloomberg New Energy Finance [45]. Her har 50 selskaper som kjøper batterier svart på hvor mye de må betale per kWh. Fra 2010 til 2017 har prisen falt fra 1000 USD/kWh til 209 USD/kWh. Det vil si at prisen har falt med 80% på 7 år, som igjen vil si at prisen for batterier for 7 år siden var nesten 5 ganger høyere enn hva den er i dag. Personene bak den prisstatistikken spår også at batteriprisen vil falle til under 100 USD/kWh innen 2025 – altså en halvering av pris de neste 7 årene. Selv om statistikken er et gjennomsnitt av data for flere typer batterier er den oppgitt til å være representativ for kostnadene for bilbatterier.

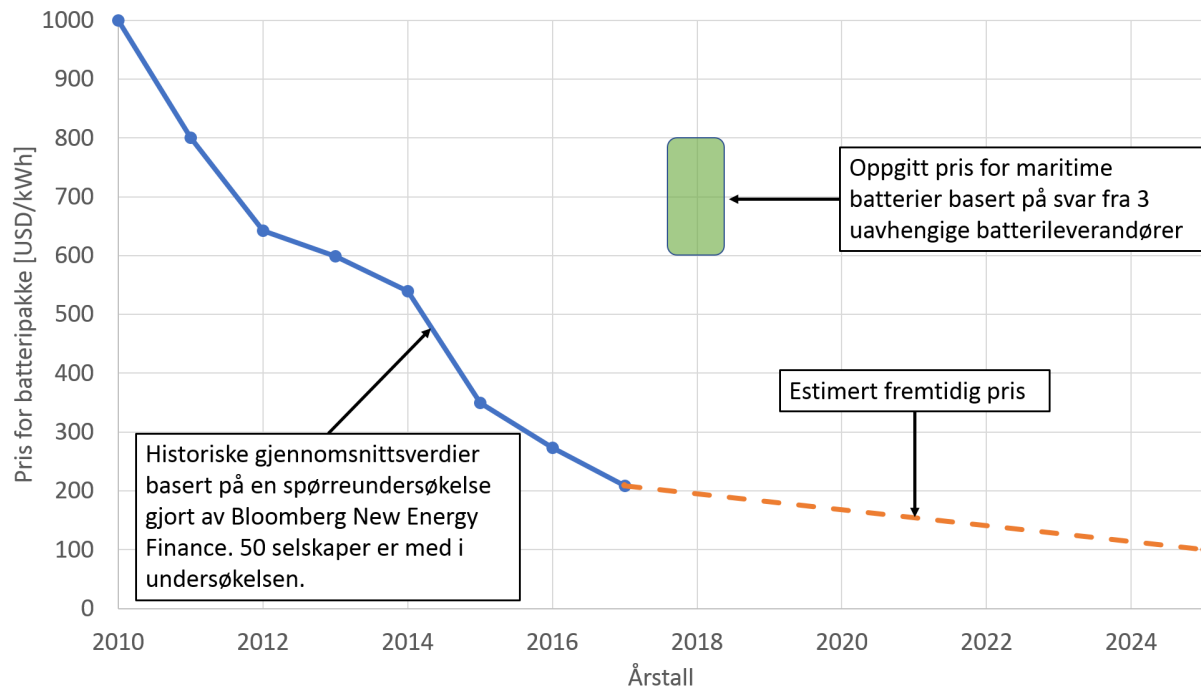
Som vist i Figur 73 er prisene på batterier til maritim industri en del høyere enn de man har i bilindustrien. Konsortiet har innhentet priser fra tre større maritime batterileverandører, og fått verdier som ligger innenfor området 600 USD/kWh til 800 USD/kWh. Dette tilsvarer 4900-6500 NOK/kWh. Maritime batterier koster altså 2-3 ganger mer per enhet energi, enn hva bilbatterier gjør. En annen måte å se dette på er at prisene på dagens maritime batterier er sammenlignbare med prisene på bilbatterier 6-7 år tilbake i tid.

I et forsøk på å finne en forklaring på dette har vi kontaktet flere batteriprodusenter og spurt om en forklaring på hvorfor deres batterier er dyrere enn bilbatterier. Battericellene er ofte de samme – de leveres gjerne av LG, Kokam eller XAlt Energy – så i utgangspunktet kan prisforskjellen virke overraskende. Forklaringene vi fikk fra batteriprodusentene er imidlertid god:

- **Dårligere innkjøpsavtaler for battericeller.** Ved innkjøp av battericeller fra store leverandører er det stor forskjell på prisene som blir gitt til store kunder relativt til små. Selv om det har vært mye aktivitet knyttet til elektrifisering av maritim industri i Norge de siste årene er det fortsatt langt igjen før leverandørene av maritime batterier når de kvantum som finnes i bilindustrien. Corvus Energy, verdens største leverandør av maritime batterier, uttalte tidligere i år at de siktet mot totale leveranser på 140 MWh i 2019. Til sammenligning

produserer Tesla ifølge sine egne data batteripakker med samlet kapasitet på 23 000 MWh i sin «Gigafactory» [46]

- **Mye skreddersøm per enhet energi.** Maritime batterileverandører må lage sine egne systemer for overvåking, styring, kjøling og brannsikring for sine batteripakker, på samme måte som hva leverandører til bilindustrien må gjøre. Utviklingskostnaden for dette arbeidet må imidlertid fordeles over et mindre leveransevolum.



Figur 73: Pris for batteripakker

Den globale batteriproduksjonen vokser raskt, og det samme gjør bruken av batterier i maritim næring. Førstnevnte tyder på at prisen på battericeller vil fortsette å synke, mens sistnevnte trolig vil føre til redusert prisgap mellom bilbatterier og batterier for maritimt bruk. I videre studier velger vi å benytte den nedre prisverdien vi fikk innhentet fra leverandører i dagens marked, altså 4900 NOK/kWh. Dette tror vi er en konservativ antakelse, i den forstand at reell pris ved innkjøp av batteripakker i 2021 for leveranse til hurtigbåter i 2022 trolig vil være lavere.

Hydrogensystem

Det finnes per i dag ikke noen store leveranser av hydrogensystemer for maritimt bruk, som kan gi erfaringsdata om priser. Vi har derfor innhentet informasjon fra flere etablerte leverandører av hydrogensystemer, og presenterer her en gjennomsnittlig verdi for hva de tror en leveranse vil koste.

[Redacted text block]

[Redacted text block]

Fremtidig utvikling i kostnad for hydrogensystemer er umulig å spå. Kostnaden vil mest sannsynlig falle relativt til dagens nivå, men siden det ikke finnes noen historisk pristrend å følge så finner vi det ikke rettferdig å forsøke å spå denne i nåværende arbeid. Vi velger derfor å benytte tallene presentert i forrige avsnitt i våre prisberegninger. Dette gir også en rettferdig sammenligning mellom batteri- og hydrogenpriser, da vi benytter tilgjengelige priser for dagens produkter for begge teknologier.

Kraftelektronikk

En vesentlig del av prisen på en elektrisk drivlinje vil utgjøres av elektriske motorer, invertere, transformatorer, motorkontrollere, tavler, brytere og kraftkontrollsystemer. Denne kostnaden vil i all hovedsak være lik for et hydrogenrevet og et batteridrevet fartøy. Basert på konsortiets erfaring med leveranser av elektriske kraftsystemer til maritim industri kan vi gi et godt estimat på denne kostnaden.



Dieselmotorer

Vi finner det fornuftig å inkludere referansetall for dagens situasjon i de presenterte økonomiske beregningene. Her baserer vi oss på konsortiets erfaring med kostnaden på ferdige dieselmotorbasert fremdriftssystemer for hurtigbåt.

Hydrofoilsystem

Hydrofoilsystemet som foreslås består i grove trekk av en karbonfiberkonstruksjon, et sett servomotorer, et mekanisk aktiveringssystem, sensorer og datamaskiner. Erfaring med karbonfiberkonstruksjoner tillater oss å estimere prisen på selve vingestrukturen. For øvrige komponenter har vi innhentet priser fra tilgjengelige leverandører. Vi velger å kun presentere overordnede tall i nåværende rapport, og har rundet disse av til følgende priser:



Driftskostnader

Driftskostnader til kraftsystemet består i hovedsak av innkjøpskostnader for energi og kostnader til periodisk utskifting av utslitte komponenter. Energi forstås i denne sammenhengen som ferdig komprimert hydrogen levert på kai, elektrisk strøm med høyt effektuttak levert på kai og diesel levert på kai. Priser for energi varierer med tid og antakelser, og oppdragsgiver har derfor gitt felles føringer for hvilke verdier vi skal bruke i nåværende arbeid. Disse er presentert i Tabell 7. Alle resultater baserer seg på disse tallene, slik at leseren enkelt kan skalere energikostnader til egne erfaringstall på priser for de ulike energitypene. I omregningen fra pris per kg hydrogen og liter med diesel har vi antatt brenselcellevirkningsgrad på 45% (50% ved starten av levetiden, ned mot 40% mot slutten av levetiden), og dieselmotorvirkningsgrad på 40%. Hydrogen har 33,3 kWh / kg, mens diesel har 9,94 kWh / L

For alle energilagringsformer velger vi å se bort fra kostnaden ved daglig vedlikehold fra maskinistens side. Dette fordi vi forventer at en maskinist, som i henhold til regelverket alltid må være til stede, vil kunne gjennomføre alt daglig vedlikehold for alle tre alternativer.

Tabell 7: Energipriser oppgitt fra oppdragsgiver. Høyre kollonne gir priser omregnet til kostnad per enhet energimengde.

Energibærer	Oppgitt pris	Pris omregnet til energipris
Elektrisk strøm	0.95 NOK/kWh	0.95 NOK/kWh
Hydrogen	45 NOK/kg	3.0 NOK/kWh
Diesel	7 NOK/L	1.8 NOK/kWh

Slitasje av batterier

Dimensjonering av batteripakker innebærer et kompromiss mellom vekt og levetid. Dette er diskutert i mer detalj i andre deler av denne rapporten. I nåværende studium har vi dimensjonert alle batteripakker slik at de vil tåle 5 års operasjon med de driftsprofiler som er relevante for trøndelagsrutene. Etter denne tiden vil ikke batteripakken være ødelagt, men den vil ha mindre enn 80% av opprinnelig kapasitet. Mye tilsier at man vil ha en restverdi av batteripakken, for eksempel ved salg til stasjonær energilagring eller til energilagring i et mindre vektsensitivt fartøy enn en hurtigbåt. Denne restverdien er per i dag vanskelig å estimere, og vi har valgt å sette verdien til null etter 5 år. Prisen på arbeidet med utskifting av batteripakken er også utfordrende å estimere i detalj, og vi har derfor valgt å se bort fra denne i beregningene. Disse effektene trekker i hver sin retning, og man kunne trolig diskutert lenge hvorvidt den ene oppveier den andre. Konsortiet tror at feilen ved neglisjering av begge effekter er liten, da både restverdi og arbeidskost ved utskifting trolig vil være liten sammenlignet med nypris på batteriene. Årlig «vedlikeholdskostnad» på batterier estimeres ut fra dette som en femtedel av innkjøpskostnaden på batteripakkene for hvert enkelt fartøy.

Slitasje av brenselceller

Et brenselcellesystem vil, som et batterisystem, slites med tiden. For brenselcellene er det selve membranen i cellene som slites. Nøyaktig levetid på membraner i maritim bruk finnes det lite datagrunnlag på. Ballard Power Systems oppgir på sin nettside [47] at deres brenselcellemoduler for transportapplikasjoner har oppnådd 25 000 levetidstimer i felt. Ved direkte samtaler opplyses det at de lengstlevende modulene har vart enda lenger enn dette. Vi har ikke lyktes å få tak i statistikk på typisk levetid. Vi velger å regne med en gjennomsnittlig levetid på 6 år, som tilsvarer 19 000-25 000 timer i typisk hurtigbåtdrift på trøndelagsrutene.

Slitasje av dieselmotorer

Dieselmotorer varer vesentlig lengre enn batterier og brenselceller, men krever mellom- og hovedservice med jevne mellomrom. Konsortiet har innhentet erfaringsdata for denne type arbeid for fartøyer tilsvarende de som trafikkerer trøndelagsrutene i dag. Vi velger å ikke oppgi detaljerte tall i teksten, men heller oppgi skalerte tall i figurene senere i kapitlet.

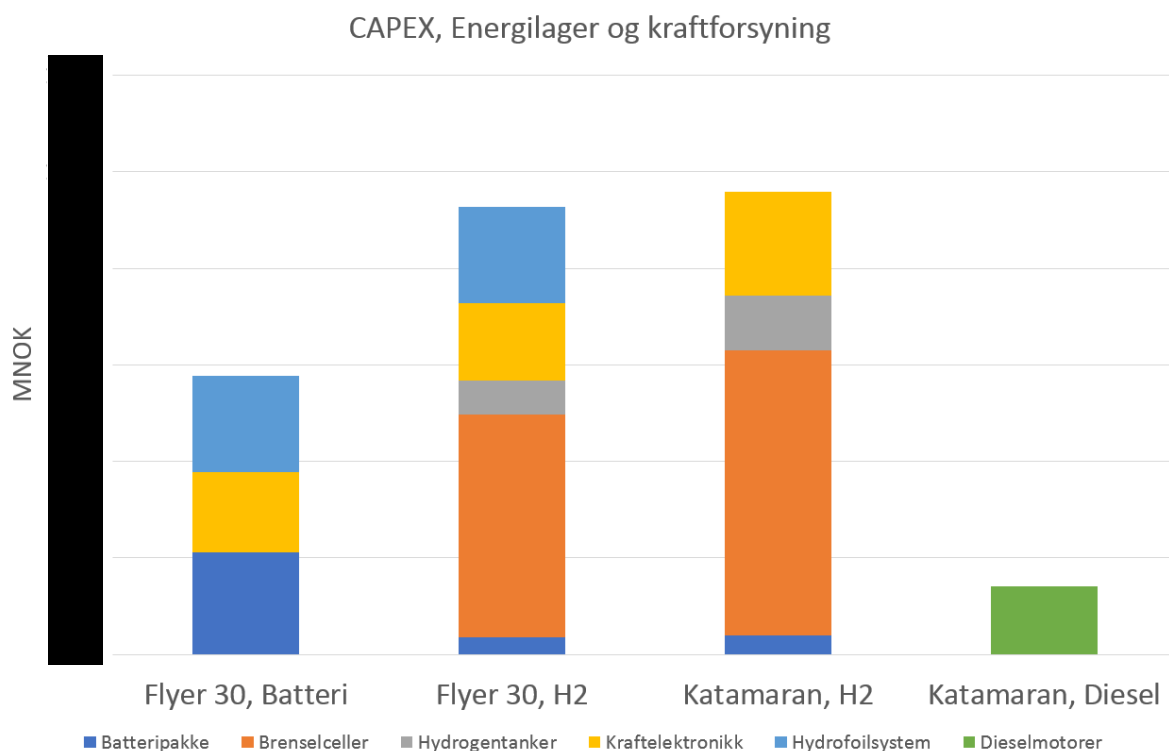
Resultater

Med konkrete tallverdier for utstyrs- og energikostnader, i tillegg til verdier for energibruk og driftsprofil, er man i stand til å beregne innkjøps- og driftskostnader for fartøyene på hver enkelt rute i trøndelagsanbudet. Siden konsortiet både har jobbet med batteri- og hydrogenalternativer velger vi å presentere tall for begge deler. I den sammenhengen vil vi påpeke at det er batterialternativet som er vårt konkrete forslag, mens kostnadene på hydrogenalternativet er tatt med som referanse. For å sette tallene i perspektiv tar vi også med kostnader for konvensjonelle katamaraner, både med diesel- og hydrogendrift.

Trondheim – Kristiansund

Innkjøp

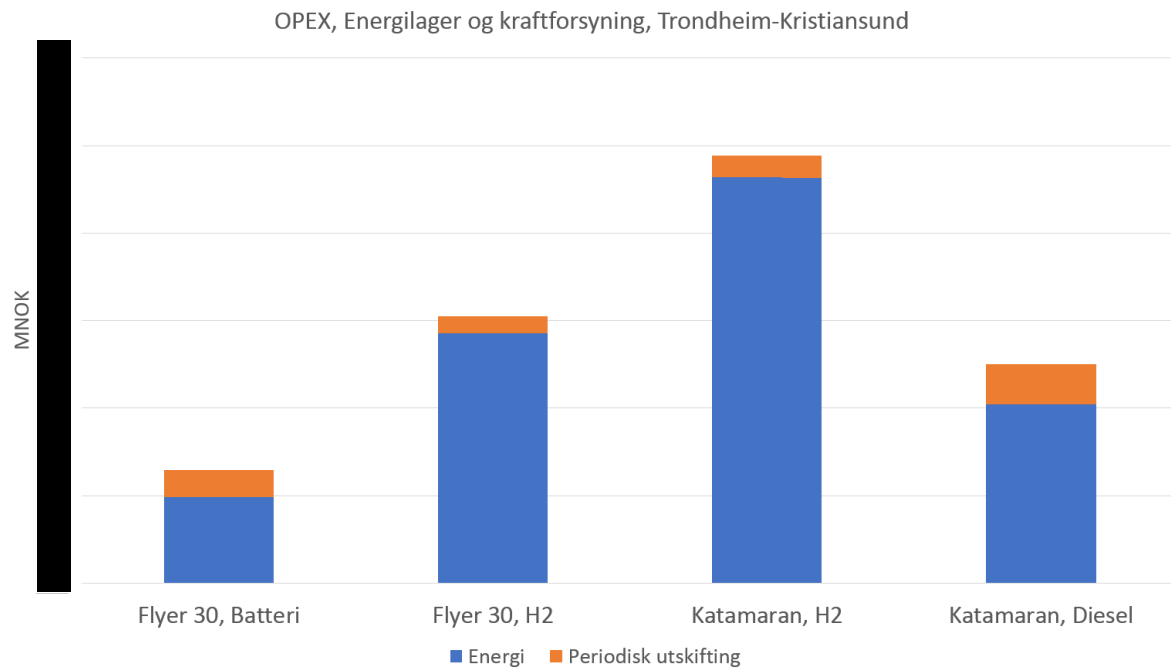
Totale innkjøpskostnader for drivlinjen for fartøyer som kan trafikkere rutene Trondheim-Kristiansund og Trondheim-Brekstad er presentert i Figur 74. Tallene inkluderer lagring av energi og omsetning av denne til moment på drivaksel. For batterialternativet vil dette si at man inkluderer batterier, tavler, brytere, strømstyring, transformatorer, invertere, motorkontrollere og elektriske motorer. For hydrogenalternativene inkluderer man de samme komponentene, pluss brenselceller og hydrogentanker. Konsortiets fartøy, Flyer 30 med batteridrift, vises helt til venstre.



Figur 74: Innkjøpskostnader for energilager og kraftforsyning for fartøyer som kan trafikkere rutene Trondheim-Kristiansund og Trondheim-Brekstad

Drift

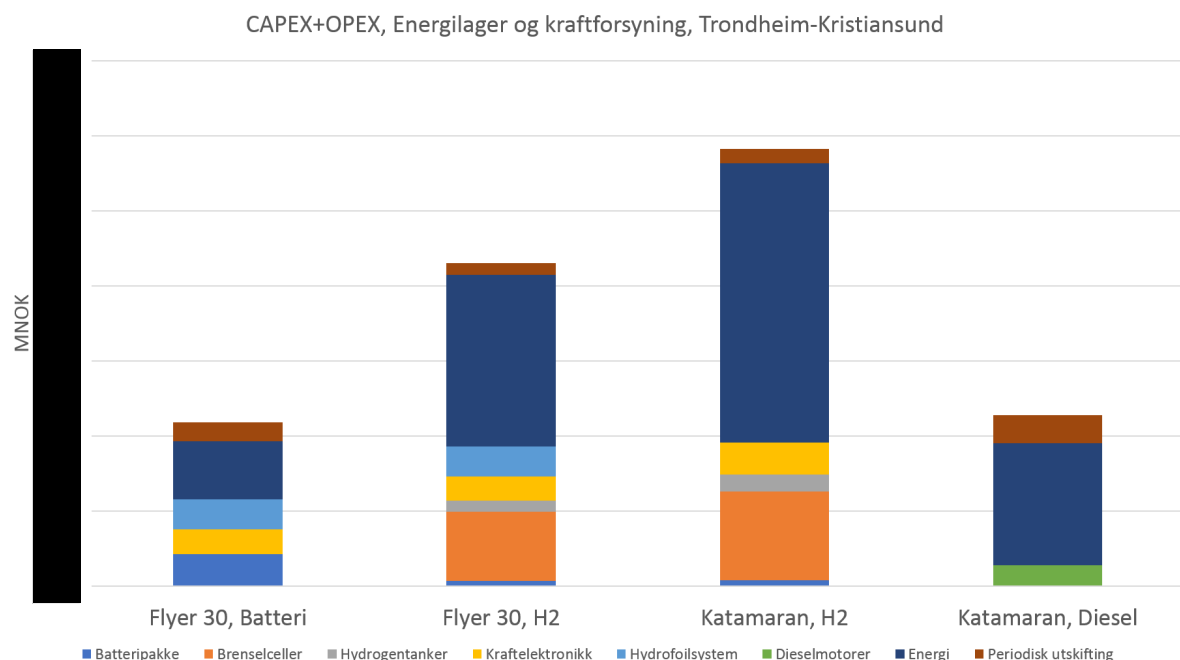
Driftskostnader for ruta Trondheim-Kristiansund, som summerer innkjøp av energi og periodisk utskifting og overhaling av kraftsystemet, er presentert i Figur 75. Beløpene er gitt for ett av de to fartøyene som trengs for å trafikkere ruta.



Figur 75: Driftskostnader på energisystem for fartøyer på ruta Trondheim-Kristiansund

Sum av innkjøp og drift

For å få et visuelt inntrykk av forskjellen på de ulike løsningene over en 8-års anbudsperiode har vi tatt med figurer som summerer kostnaden av innkjøp og drift. Figur 76 viser dette for ruta mellom Trondheim og Kristiansund.



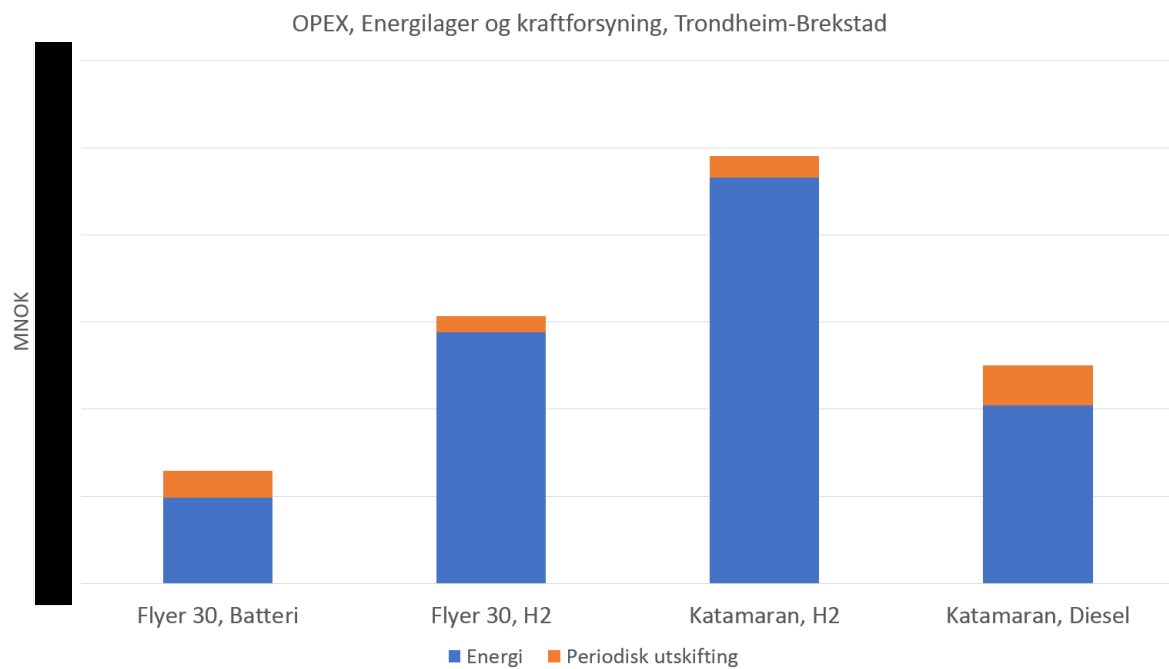
Figur 76: Sum av innkjøps- og driftskostnader på drivlinja for ulike fartøytyper på ruta mellom Trondheim og Kristiansund. Driftsutgifter er enkelt summert, uten nåverdiberegning.

Trondheim – Brekstad

På ruta mellom Trondheim og Brekstad foreslås det et identisk fartøy med det som brukes mellom Trondheim og Kristiansund. Figur 74 gir dermed innkjøpskostnader som også er gyldige her.

Drift

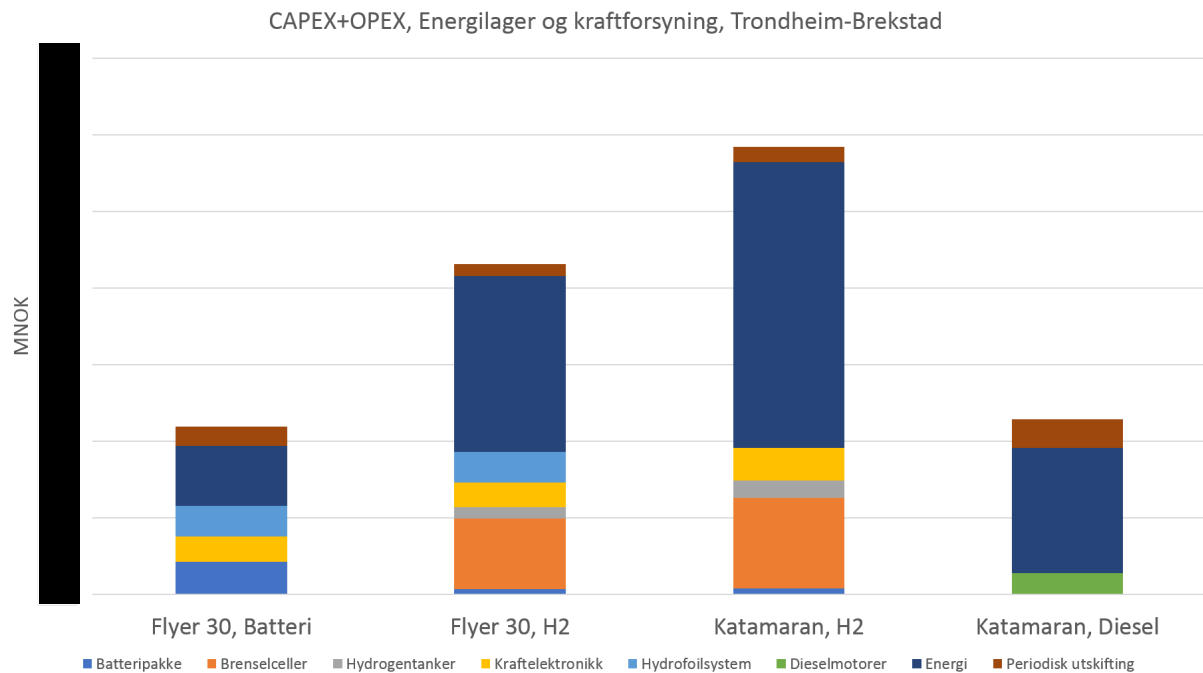
Driftskostnader for kraftsystemet på ruta mellom Trondheim og Brekstad kan finnes i Figur 77. Resultatene er nesten identiske med tallene for Trondheim-Kristiansund, da tilbakelagt distanse per båt er så å si lik mellom de to rutene.



Figur 77: Driftskostnader for energilager og kraftforsyning for ruta mellom Trondheim og Brekstad

Sum av innkjøp og drift

Sum av innkjøps- og driftskostnader for ruta mellom Trondheim og Brekstad kan finnes i Figur 77. Igjen er tallene nesten like med tilsvarende verdier per fartøy for ruta mellom Trondheim og Kristiansund.



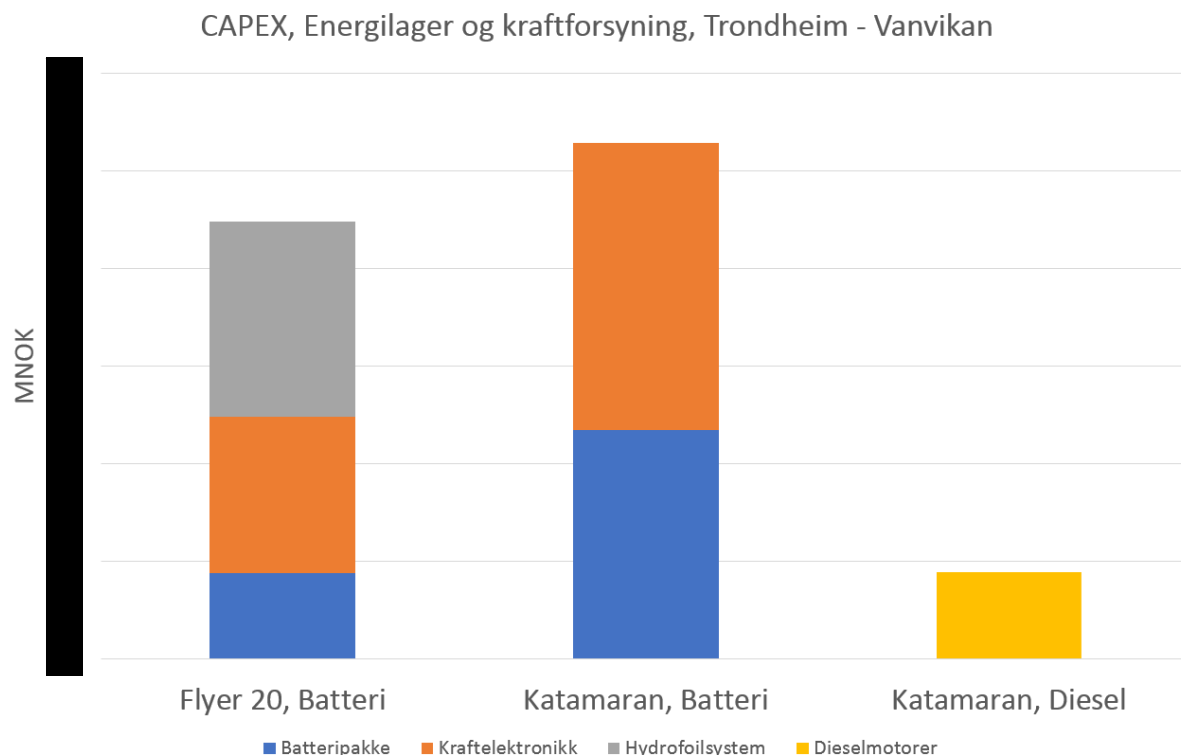
Trondheim – Vanvikan

Ved estimering av innkjøps- og driftskostnader på ruta mellom Trondheim og Vanvikan har vi henhold til øvrige deler av rapporten valgt å utelate hydrogenalternativet. Her er det mulig å kjøre en konvensjonell katamaran på batteridrift, og vi ser derfor alternativet med en konvensjonell katamaran på hydrogendrift som mindre aktuelt.

Ved rutesimulering har konsortiet funnet at det ikke vil være mulig å bruke bare ett fartøy om dette skal gå med dagens hastighet på 25 knop. Den konvensjonelle katamaranen med batteridrift er simulert med denne hastigheten, og vi summerer derfor innkjøpskostnadene for kraftsystemet og kostnadene for periodisk utskifting av dette for to fartøy. Vi ønsker i denne sammenhengen å nevne at det å kjøpe inn to fartøyer ikke bare vil doble kostnadene på kraftsystemet, men også doble kostnadene på øvrige deler av båten. Øvrig kostnad på en båt må altså legges til i midterste søyle i Figur 78 og Figur 80, om man skal ha en helt rettferdig sammenligning. Siden alle andre data i dette kapitlet handler om energilager og drivlinje, velger vi å ikke legge til disse dataene for øvrige deler av fartøyet i plottene.

Innkjøp

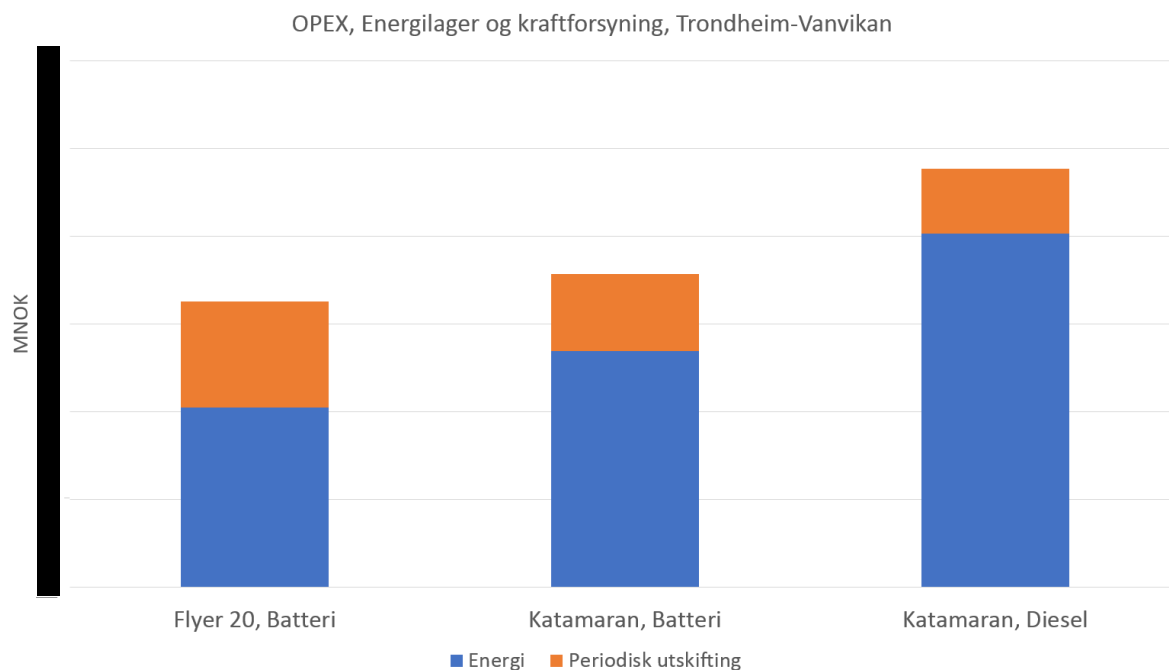
Innkjøpskostnader for energilagering og drivlinje for fartøyer som kan trafikkere ruta mellom Trondheim og Vanvikan er presentert i Figur 78.



Figur 78: Innkjøpskostnader for kraftsystem for Fartøyer som kan trafikkere ruta Trondheim-Vanvikan

Drift

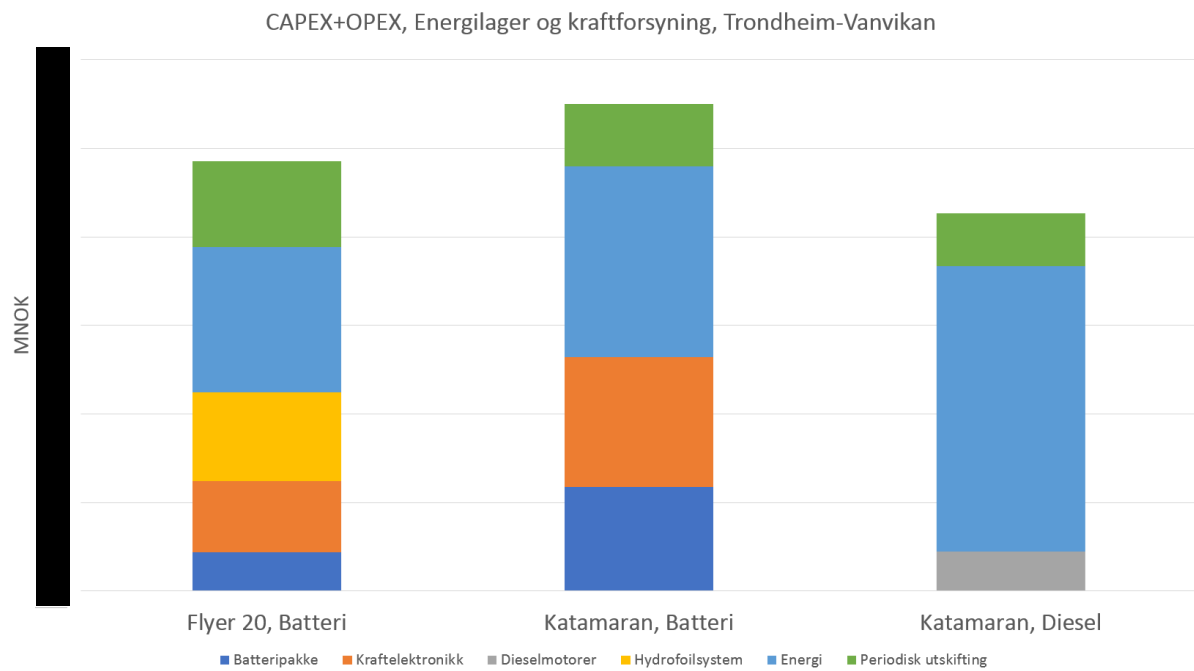
Driftskostnader for energilagering og drivlinje for fartøyer som kan trafikkere ruta mellom Trondheim og Vanvikan er presentert i Figur 79.



Figur 79: Driftskostnader for fartøyer som kan trafikkere ruta mellom Trondheim og Vanvikan

Sum av innkjøp og drift

Summerte innkjøps- og driftskostnader for fartøyer som kan trafikkere ruta mellom Trondheim og Vanvikan er presentert i Figur 80.



Figur 80: Summerte innkjøps- og driftskostnader for kraftsystemet på fartøyer som kan trafikkere ruta mellom Trondheim og Vanvikan

SIKKERHET

En nullutslippshurtigbåt må ha et sikkerhetsnivå for passasjerer og mannskap tilsvarende dagens nivå eller bedre.

Flyer 20 og Flyer 30 har potensialet til å bli de første batteridrevne hydrofoilhurtigbåtene i verden. Det er god grunn til å vurdere risikomomenter ved en slik båt ekstra nøye, og både sjøfartsdirektoratet og classeselskap kommer til å kreve dokumentasjon på at alle tenkelige faremomenter er identifisert og løst. I løpet av dette prosjektet har sikkerhet vært et gjennomgående tema for alle involvert i konsortiet. Vi har gjennomført en «Hazard Identification (HAZID) prosess sammen alle konsortiedeltagere, batteriprodusenten Corvus og Sjøfartsdirektoratet. Designselskapet Paradis Nautica var ansvarlig for gjennomføringen av HAZID-prosessen. Rapporten de skrev i etterkant av HAZID-møtet ligger ved denne rapporten som vedlegg.

I dette kapittelet vil vi beskrive områdene vi har vurdert som risikofylte, sammen med vår anbefalte løsning på disse problemene. Den endelige vurderingen av sikkerheten ombord i Flyer 20 og Flyer 30 vil bli gjort i samarbeid med classeselskap og sjøfartsdirektoratet i forbindelse med godkjenningssprosessen som alle båter må igjennom før bygging. Vi forventer at Flyer 20 og Flyer 30 kan tilfredsstille alle sikkerhetskrav. Dette baserer vi på at både hydrofoilbåter og batteribåter har vært bygget før. Det som er nytt med Flyer 20 og Flyer 30 – utover forbedret hydrofoildesign – er primært kombinasjonen av hydrofoiler og batterier. Vi kan ikke se at dette innebærer noen større risiko enn at de samme grunnprinsippene bak tidligere hydrofoilbåter og nåværende batteribåter kan ligge til grunn.



Figur 81: Flyer 20 og Flyer 30 er kombinasjonen av to kjente teknologier: hydrofoiler og batterier.

Under er har vi listet opp risikomomenter med tiltak som har vært vurdert i dette prosjektet.

Batteribrann

Den største faren med batterier er at de kan fyr. Dette kan f.eks. skje ved at en av cellene i batteripakken opplever feil, f.eks. som resultat av for høy eller for lav spenning. Dette kan føre til stor varmeutvikling i en celle, som igjen fører til en kjedereaksjon hvor flere celler blir ødelagt og tar fyr.

Maritime batteriprodusenter har løsninger på denne problemstillingen innebygd i batteripakkene. Det er nøye overvåkning av både spenning og temperatur i hver enkelt celle i batteripakken. Hvis en celle opplever feil er batteripakken konstruert slik at dette ikke skal føre til skader på andre celler. Løsningene utviklet av batteriprodusentene er godkjent av både classeselskap og sjøfartsdirektoratet.

I tillegg til dette er alle batterirom brannisolert etter samme standarder som vanlige maskinrom i en hurtigbåt. Det vil si at batterirommet er kledd med ikke-brennbart materiale i form av tynne metallplater på veggene.

Hvis brann likevel skulle oppstå er det i tillegg ekstra ventilasjon i batterirommet for å få ut farlige avgasser fra batteriet

Tom for strøm

I en nødsituasjon kan det være kritisk om batteriet går tom for strøm. For å unngå dette er batteriet dimensjonert slik at kun 64% av energien brukes under normal drift. Det vil si at 36% av energien ombord i batteriet er tilgjengelig for nødsituasjoner. Energibruken til en hurtigbåt er desidert størst når båten beveger seg i marsjfart. Man bør derfor unngå bevegelse i stor hastighet i en nødsituasjon.

Feil på kraftforsyningsystemet.

Ved en eventuell feil på en eller flere komponenter i kraftforsyningsystemet risikerer viktige komponenter i Flyer 20 og Flyer 30 å miste strøm. Dette kan f.eks. føre til at kontrollsystemet og fremdriftsmaskineri slutter å fungere. Hvis dette skjer brått, mens man flyr i 40 knop kan man miste kontroll på båten som vil medføre økt risiko.

For å minimere denne risikoen er batteripakken og alt kraftforsyningsutstyr delt i to uavhengige systemer. Hvert skrog inneholder hver sin kraftforsyningspakke. Alle systemer hvor det er dobbelt opp av komponenter, som f.eks. aktuatorerne for flykontrollsystemet og fremdriftsmaskineriet, er koblet slik at komponentene er koblet til hver sin batteripakke. Hvis f.eks. en av batteripakkene av en eller annen grunn slutter å levere strøm til sine komponenter så vil maksimalt halvparten av alle styreflater og motorer slutte å fungere. Man kan fortsatt gjennomføre en nødlanding av båten med gjenværende styreflater, og komme seg til land med gjenværende motorer.

Kollisjon med andre skip

Kollisjon med andre skip er alltid et faremoment for alle typer hurtigbåter. For en batteribåt er det en økt fare ved at selve kollisjonen kan skade batteripakken på en måte som får den til å ta fyr (se seksjonen over for tiltak mot batteribrann).

For å minimere denne risikoen er alle batteripakker satt langt unna den ytre skutesiden. Se plantegning av nedre dekk i kraftforsyningskapittelet for illustrasjon av hvordan dette ser ut. Formålet med denne plasseringen er å minimere risikoen for at skader på skipet fra utsiden skal føre til skader på batteripakken.

Problem med fremdriftsløsningen

Alle skip kan oppleve problemer med fremdriftsløsningen. Hvis et skip mister all motorkraft er det risikoen for at skipet kan drive på land eller på grunn.

Dette løses i Flyer 20 og Flyer 30 ved at det er totalt 3 uavhengige motor + vannjetpakker. Det er en vannjet i hvert skrog, pluss en stor vannjet i halen. Vannjeten i halen har også to motorer. Hvis den ene motoren slutter å fungere på hovedvannjeten vil fortsatt den andre kunne drive båten fremover i redusert hastighet.

Kollisjon med flytende objekter i vannet

Både hydrofoilbåter og konvensjonelle båter risikerer å kolliderer med flytende objekter i vannet, som f.eks. tømmerstokker, bildekk og i verste fall store tunge objekter som containere. Hydrofoilsystemet er i større grad utsatt for alvorlige skader ved en slik situasjon enn et konvensjonelt skrog.

For Flyer 20 og Flyer 30 er det foreslått to løsninger på kollisjonsproblematikken. Den første løsningen er å sørge for at hydrofoilsystemet er tilstrekkelig robust til å tåle kollisjoner med små

objekter – som veier betydelig mindre enn skipet, som f.eks. bildekk. Dette ansees som relativt enkelt å få til, da kreftene fra en slik kollisjon ikke er forventet å være store relativt til de hydrodynamiske kreftene hydrofoilsystemet opplever under normal drift.

En større utfordring er kollisjon med store tunge objekter. I en slik situasjon er det mest sannsynlig ikke mulig å redde hydrofoilsystemet. Et konvensjonelt skrog vil mest sannsynlig også oppleve alvorlige skader ved f.eks. en kollisjon med en container.

Det viktige i en slik situasjon er så sørge for at skaden på hydrofoilsystemet ikke fører til skade på passasjerer og mannskap. Vi foreslår derfor å legge inn et svakt ledd i selve konstruksjonen som binder hydrofoilene til skroget. Ved en kollisjon hvor hydrofoilsystemet potensielt blir revet av skrogkonstruksjonen vil dette da føre til minimalt med skade på resten av skroget.

I tillegg er alle hurtigbåtskrog fra før konstruert med vanntette skott og dobbeltbunn. Dette vil si at båten ikke vil synke om det blir små lokale skader på skrogene.

Feil på sensormålinger eller datamaskintrøbbel

Kontrollsystemet som sørger for at båten flyr stabilt trenger informasjon fra sensorer som blir prosessert av datamaskiner. Hvis det oppstår feil på en av disse, slik at kontrollsystemet ikke lenger har en nøyaktig beskrivelse av bevegelsen til båten kan kontrollsystemet sette styreflatende til båten i en posisjon som kan føre til krasjlanding.

For å minimere risikoen for at dette skjer har vi 3 sett av alle sensorer og datamaskiner. Hver datamaskin kjører hele kontrollsystemet uavhengig av hverandre, før en 4. datamaskin samler inn resultatene fra alle sammen og sammenlikner dem. Feil på enten en sensor eller en datamaskin kan oppdages ved at komponenten med feil har store avvik fra de to komponentene uten feil. Dette kan igjen brukes til å bestemme at komponenten med feil ikke skal være med i vurderingene til kontrollsystemet.

Denne risikoen kan altså minimeres ved hjelp av redundante komponenter. De fleste av disse komponentene er billig i innkjøp, og den økonomiske konsekvensen ved å ha ekstra sikkerhet er veldig liten.

Feil på aktueringsmaskineriet

Selv om alle sensorer og datamaskiner er redundante kan det oppstå feil på kontrollsystemet ved at selve aktueringsmaskineriet feiler. Dette kan skje enten ved tap av strøm (se egen seksjon om dette) eller på grunn av skade på de elektriske motorene som gjør at de låser seg eller mister all kraft.

Det første tiltaket mot slike problemer er å ha dobbelt opp av alle komponenter. Det inkluderer dobbelt opp med styreflater og motorer. Hvis kun en motor eller en styreflate låser seg er det fortsatt flere andre som kan brukes til å motvirke effekten av dette.

Det verste som kan skje er at flere styreflater slutter å fungere samtidig. Dette kan føre til krasjlanding av båten. Det kan ikke føre til at båten velter, da stabiliteten til katamaranskrogene er mer enn tilstrekkelig til å motvirke enhver kraft vi kan generere fra vingene. En eventuell krasjlanding kan likevel oppleves dramatisk, og potensielt føre til skader.

En situasjon hvor alle styreflate slutter å fungere samtidig er regnet som usannsynlig. Det er mer sannsynlig at en styreflate settes ut av drift. Dette vil føre til at de resterende styreflatende må

brukes til å gjennomføre en kontrollert landing av skipet, før man kommer seg til land i redusert hastighet.

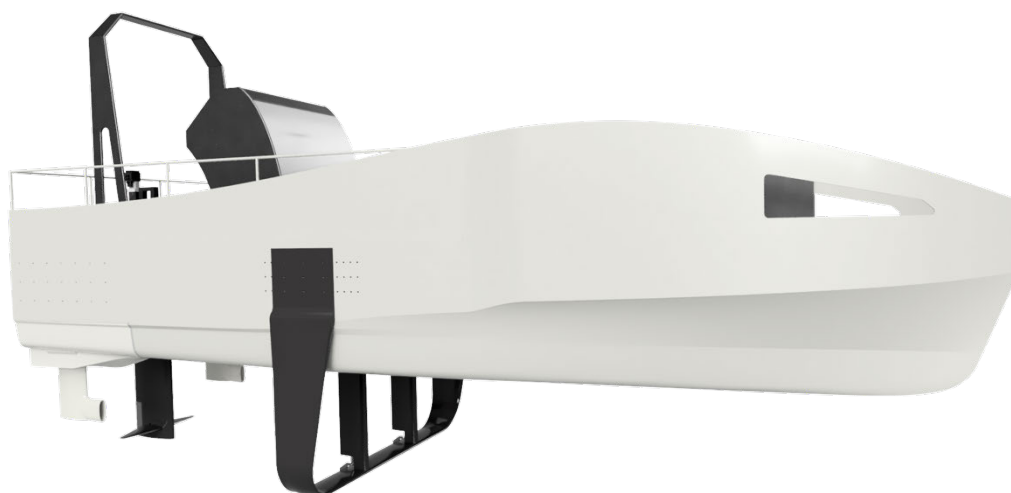
Generell løsning på de fleste problemer knyttet til flyging

Ved alle problemstillinger knyttet til flyging er det en generell løsning som alltid vil fungere: reduksjon av hastigheten ved å redusere pådraget på motorene manuelt. Dette gjør at båten umiddelbart begynner oppbremsing, som hurtig reduserer hastigheten til båten. Hvis båten mister hastighet vil den lande kontrollert av seg selv. Kontrollsystemet vil ha innebygd automatisk reduksjon av hastighet hvis det selv oppfatter et problem, og mannskapet ombord vil alltid ha direkte uavhengig kontroll over fremdriftsløsningen, slik at det alltid kan overstyre kontrollsystemet og redusere hastigheten hvis de føler behov for dette.

Det å miste hastighet for en hydrofoilbåt er helt annerledes enn f.eks. et fly. Det er kun 0,5 m fra undersiden av kjølen på skroget til vannoverflaten. Selv ved en relativ brå tap av hastighet er det verste som skjer at båten faller 1,8 m ned, før oppdriften fra skrogene er stor nok til at vekta fra båten kan bæres helt uten løft fra hydrofoilsystemet.

PROTOTYPE – FYSISK VERIFISERING AV TEORI

Flying Foil AS har det siste året jobbet med en prototype av en batteridrevet hydrofoilsbåt bygget i karbonfiber. Denne prototypen skal brukes til å verifisere energieffektiviteten til hydrofoildesignet, teste kontrollsystemet, og utvikle byggemetoder. Den er i grove trekk bygd som en vitenskapelig nedskalert versjon av Flyer 30. Det vil si at geometrien til både skrog og vinger tilsvarer en fullskala hydrofoilsbåt, bare skalert ned til $\frac{1}{4}$ av størrelsen. Båten er bygd på verftet til Brødrene Aa, drevet av batterier fra den maritime batteriprodusenten EST-Floattech. Kontrollprogramvaren og sensorer er tilsvarende de som er planlagt brukt på Flyer 20 og Flyer 30. Selve mekanismen for styreflatene til hydrofoilsystemet er også bygget så nært fullskala komponenter som overhodet mulig. En illustrasjon laget fra CAD modellen til prototypen kan sees i figuren under. Deretter kommer en tabell med spesifikasjoner.



Figur 82: Illustrasjon av CAD modellen bak prototypen

Variabel	Verdi
Lengde	7 m
Bredde	2.6 m
Chordlengde	26 cm
Lettskipsvekt	1 200 kg
Designhastighet	20 knop
Installert batterikapasitet	21 kWh
Installert motoreffekt	40 kW

Denne prototypen er betydelig større enn typiske modeller brukt til testing i f.eks. slepetanker, som typisk er 3-4 m lange, og betydelig smalere. Årsaken er at vi ved hjelp av en stor prototype kan gjennomføre mer realistisk tester av systemet. Detaljer i hvordan både strukturen og hydrodynamikken oppfører seg endrer seg som funksjon av båtstørrelse. Jo større prototype man bygger, jo nærmere er man virkeligheten.

Den originale planen var at prototypen skulle være helt klar til utgangen av utviklingskontrakten, noe vi også nesten greide. Etter en veldig hektisk byggeperiode fra Mars 2019 ble en «ferdig» prototype ble sjøsatt i midten av juni 2019. Vi gjennomførte tester av batteri, kraftforsyning, sensorer og aktueringsystem og alt fungerte som det skulle. Dessverre var det en viktig komponent som ikke fungerte. Vannjetkanalen som ble produsert for prototypen var blitt laget med for stor unøyaktighet,

noe på grunn av kompleks geometri på designet for prototypen, og noe på grunn av feil produksjonsmetode. Dette førte til at vannjetene som var installert ombord ikke fikk nok vann til å produsere fremdriftskraft i nærheten av hva de egentlig skal greie. Versjonen av prototypen som var klar i juni greide dermed ikke å bevege seg fremover fortere enn noen få knop.

Løsningen på dette problemet er relativt enkel: vi må produsere nye vannjetkanaler. Designet på selve kanalene blir litt endret, for å muliggjøre enklere produksjonsmetoder, og vi har også gått fra å bruke totalt 4 vannjetter i prototypen til å kun bruke 2. Prosessen med å få produsert nye vannjetkanaler har begynt når vi skriver denne rapporten. Dessverre vil det ta litt tid å få det helt ferdig, og sjøsetting og testing av prototypen vil nok ikke skje før mot vinteren. Selv om vi ikke rakk å teste det prototypen originalt var bygd for i løpet av utviklingskontrakten har vi lært mye nyttig i prosessen. En viktig bit har vært utvikling av byggemetoder. Noen detaljer i hvordan vi designer blant annet mekanikken til styreflatene er endret på grunn av erfaringer vi har gjort i prototypeprosjektet.

Utviklingskontrakten har vært en viktig årsak til at vi har fått mulighet til å bygge en prototype. Under kommer et sett med bilder som viser prosessen fra tidlige tester til (nesten) ferdig båt.



Figur 83: 19. September 2018 - Testing av vannjetten til prototypen ved hjelp av en gummibåt



Figur 84: 2. November 2018 - formene til skroget er ferdig frest



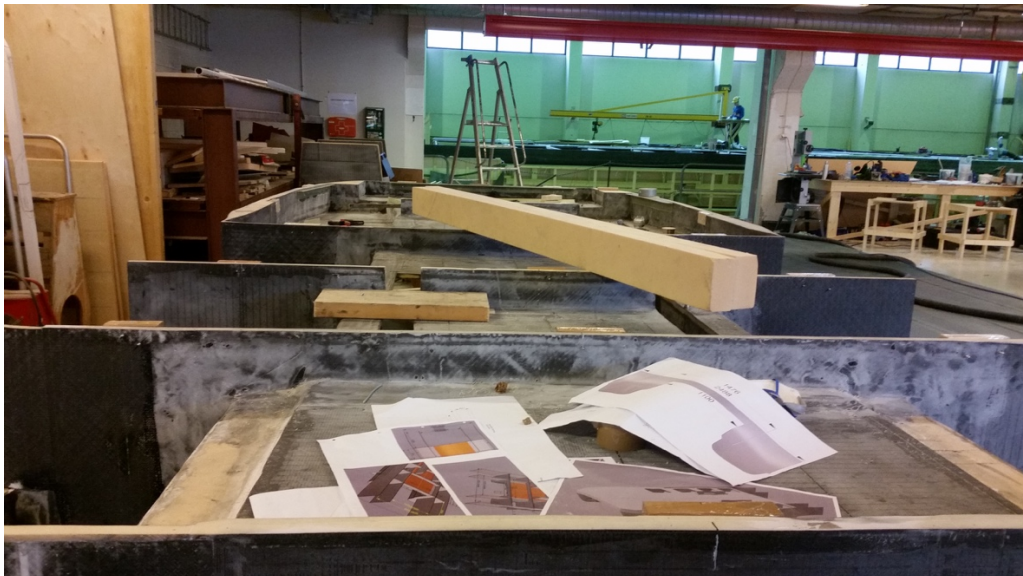
Figur 85: 7. November 2018 - skrogene er klare for å bli kledd med karbonfiber



Figur 86: 6. Februar 2019 - Skroget er ferdig kledd med karbonfiber



Figur 87: 6. Februar 2019 - Formene til hovedvingen er klare



Figur 88: 13. Februar 2019 - Detaljer på skroget ferdigstilles



Figur 89: 1. Mars 2019 - Sidekanter til skroget blir montert



Figur 90: 1. Mars 2019 - Midtstøtter og hovedvinge støpes sammen



Figur 91: 6. Mars 2019 - Halen begynner å ta form



Figur 92: 8. Mars 2019 - Båten levert fra Brødrene Aa i Sogn og Fjordane til Trondheim for ferdigstilling hos Flying Foil



Figur 93: 19. Mars 2019 - Montering av styreflater på hovedvinge



Figur 94: 21. Mars 2019 - Montering av styreflater på hale



Figur 95: 1. April 2019 - Frakt av båten for fremvisning på hurtigbåtkonferansen i Trondheim



Figur 96: Utsikten fra hotellet hvor hurtigbåtkonferansen ble holdt



Figur 97: 17. April 2019 - Sending av maskinrom fra Brødrene Aa



Figur 98: 14. Mai 2019 - Maskinrom er ferdigmontert



Figur 99: 16. Mai 2019 - Montering av vanjet



Figur 100: 29. Juni - første sjøsetting av båten



Figur 101: 15. Juni 2019 - Første sjøprøve

Videre utvikling kommer! Følg Flying Foil på Facebook og LinkedIn for oppdateringer på prototypeprosjektet og mye annet fremover!

KONKLUSJON

Et av spørsmålene i denne utviklingskontrakten var å finne ut av om det er mulig å drift hurtigbåtene i Trøndelag uten utslipp av miljøskadelige gasser hverken lokalt eller globalt. **Svaret på det er ja.** Fra et rent teknisk perspektiv er det fullt mulig både med konvensjonelle båter og hydrofoilbåter og både med hydrogen og batteri som energilagring. Det reelle spørsmålet er hva alt dette vil koste. Basert på tallene vi har funnet i dette prosjektet er kostnadsforskjellen mellom batteri og hydrogen stor. Strøm kjøpt direkte fra nettet er 1/3 av estimert kostnad for hydrogen per kWh med lagret energi. Dette tilsier at hurtigbåter bør bruke batteri for kostnadseffektiv drift. Problemet er at batterier veier mye, noe som er utfordrende da energiforbruket til hurtigbåter er sterkt avhengig av vekten.

Løsningen på dette er å redusere energiforbruket. Dette har vi fått til ved hjelp av hydrofoiler i dette prosjektet. En moderne hydrofoilbåt kan redusere energiforbruket til en batteribåt med opptil 40%, samtidig som hastigheten økes med 22%. Dette skjer både fordi motstand per vekt reduseres, men også fordi vi kan redusere vekt av både batteripakker og skrog med hydrofoildrift. Redusert energiforbruk gjør at vi kan drifte båten lenger på batteri, mens økt hastighet gjør at vi kan tillate ladestopp underveis på lange ruter, uten at dette går utover rutetabellen. Dette gjør at selv den lengste ruten i dette prosjektet kan opereres med en batteribåt.

Vi har estimert kostnader knyttet til innkjøp av kraftforsyning og hydrofoilsystem, energiforbruk og vedlikeholde. På grunn av lav strømpris vil en hydrofoil-batteribåt være konkurransedyktig mot dagens dieselbåter når det kommer til totale kostnader. Denne løsningen er også estimert til å være 50% billigere enn hydrogendrift. Tilsvarende sammenlikning mellom en batteridrevet hydrofoilbåt og en hydrogendrevet konvensjonell båt gir 62% besparelse i favør hydrofoilbåten.

Vi har også dokumentert at en hydrofoilbåt vil gi store positive konsekvenser når det kommer til komfort for passasjerene ombord. Simuleringer gjort i dette prosjektet tyder på at gjennomsnittsakcelerasjoner kan reduseres med 88%. Dette er en dramatisk endring, og fører til at sjøsyke i teorien elimineres.

Med innføring av krav til nullutslipp må noen aspekter av hurtigbåt-drift endre seg. Det må bli mye større fokus på energieffektivitet, og dette krever til en viss grad mer avanserte løsninger enn dagens båter. Gjort på rett måte kan dette likevel føre til både billigere, raskere og mer komfortable båter enn hva vi har i dag.

Vår konklusjon er derfor at Trøndelag Fylkeskommune bør innføre krav om nullutslipp på neste anbudsrunde.

BIBLIOGRAPHY

- [1] T. Stensvold, Teknisk Ukeblad, 13 Oktober 2017. [Internett]. Available: <https://www.tu.no/artikler/de-lader-ferge-med-1-2-megawatt-effekt-uten-fysisk-kontakt-med-fartoyet/409255>. [Funnet 30 August 2019].
- [2] NEL Hydrogen, «NEL Hydrogen Homepage,» [Internett]. Available: <https://nelhydrogen.com>. [Funnet 30 August 2019].
- [3] Shipax, «Shippax Market 18,» Halmstad, 2018.
- [4] Kawasaki, «Kawasaki Jetfoil Homepage,» [Internett]. Available: <http://www.khi.co.jp/corp/kjps/english/eindex.html>. [Funnet 21 August 2019].
- [5] Liberty Ship Yard, «Liberty Ship Yard Homepage,» [Internett]. Available: <http://www.libertyshipyard.it/eng/index.php>. [Funnet 21 August 2019].
- [6] Wikipedia, «Airfoil wikipedia,» [Internett]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Airfoil>. [Funnet 25 August 2019].
- [7] R. J. McGhee, W. D. Beasley og R. T. Whitcomb, «NASA Low- and Medium-Speed Airfoil Development,» NASA, 1979.
- [8] R. Eppler, Airfoil Design and Data, Springer, 1990.
- [9] Wikipeda, «Wing-tip vortices,» [Internett]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Wingtip_vortices. [Funnet 25 August 2019].
- [10] Wikipedia, «Lift-to-Drag ratio,» [Internett]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Lift-to-drag_ratio. [Funnet 25 August 2019].
- [11] J. D. Anderson, Fundamentals of Aerodynamics, McGraw-Hill, 1991.
- [12] J. V. Kramer, J. M. K. Godø og S. Steen, «Hydrofoil simulations – non-linear lifting line vs CFD,» i *Numerical Towing Tank Symposium*, Cortona, Italy, 2018.
- [13] O. foundation, «OpenFoam homepage,» 2019. [Internett]. Available: <https://www.openfoam.com>. [Funnet 8 August 2019].
- [14] Airbus, «Airbus A320 Neo homepage,» [Internett]. Available: <https://www.airbus.com/aircraft/passenger-aircraft/a320-family/a321neo.html>. [Funnet 25 August 2019].
- [15] Wikipedia, «Airframe Wikipedia Page,» [Internett]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Airframe>. [Funnet 26 August 2019].
- [16] FiReCo, «FiReCo homepage,» [Internett]. Available: <https://fireco.no>. [Funnet 26 August 2019].

- [17] L. H. Kendrick, «Development of a Cavitation Erosion Resistant Advanced Material System,» 2005.
- [18] Belzona, «Belzona,» [Internett]. Available: <https://www.belzona.com/en/products/2000/2141.aspx>. [Funnet 26 August 2019].
- [19] Asm, «Aerokret,» [Internett]. Available: <https://www.asm-usa.com/index.php/aerokret>. [Funnet 26 August 2019].
- [20] J. M. K. Godø, J. V. Kramer, S. Steen og L. Savio, «Unsteady forces on hydrofoil vessels in waves - validation of a dynamic lifting line using CFD,» i *21th Numerical Towing Tank Symposium*, Cortona, Italy, 2018.
- [21] E. C. f. M.-R. W. F. ECMWF, August 2019. [Internett]. Available: <https://www.ecmwf.int/>.
- [22] Nordforsk, Assessment of Ship Performance in a Seaway, Copenhagen: Nordforsk, 1987.
- [23] O'Hanlon, J. F. og M. E. McCauley, «Motion Sickness Incidence as a Function of Vertical Sinusoidal Motion,» *Aerospace Medicine*, pp. 366-369, 1974.
- [24] C. Riley, 12 Mars 2019. [Internett]. Available: <https://edition.cnn.com/2019/03/12/business/volkswagen-electric-cars/index.html>. [Funnet 27 August 2019].
- [25] Volvo, «The Future is Electric,» [Internett]. Available: <https://group.volvocars.com/company/innovation/electrification>. [Funnet 27 August 2019].
- [26] Airbus, «A giant leap towards zero-emission flight,» [Internett]. Available: <https://www.airbus.com/innovation/future-technology/electric-flight/e-fan-x.html>. [Funnet 27 August 2019].
- [27] F. Lambert, «Volvo delivers its first electric trucks,» [Internett]. Available: <https://electrek.co/2019/02/21/volvo-delivers-first-electric-trucks/>. [Funnet 27 August 2019].
- [28] G. Flaaten, «<https://sysla.no/maritim/enova-har-gitt-13-milliarder-stotte-til-elektriske-bater/>,» 9 Oktober 2018. [Internett]. Available: <https://sysla.no/maritim/enova-har-gitt-13-milliarder-stotte-til-elektriske-bater/>. [Funnet 27 August 2019].
- [29] NTB, «Ny helelektrisk katamaran bygges i Gloppen,» 2 Juni 2017. [Internett]. Available: <https://www.tu.no/artikler/ny-helelektrisk-katamaran-bygges-i-gloppen/395088>. [Funnet 27 August 2019].
- [30] T. Stensvold, «Møt Elfrida – verdens første elektriske arbeidsbåt,» Teknisk Ukeblad, 8 Februar 2018. [Internett]. Available: <https://www.tu.no/artikler/mot-elfrida-verden-forste-elektriske-arbeidsbat/376294>. [Funnet 27 August 2019].
- [31] Battery University, «Battery Univeristy homepage,» [Internett]. Available: <https://batteryuniversity.com>. [Funnet 29 August 2019].

- [32] Wikipedia, «Tesla Roadster Wikipedia page,» [Internett]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_Roadster_\(2008\)#Battery_system](https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_Roadster_(2008)#Battery_system). [Funnet 30 August 2019].
- [33] Wikipedia, «Tesla Model S Wikipedia Page,» [Internett]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_Model_S#Battery. [Funnet 30 August 2019].
- [34] P. Limo, «2018 Nissan Leaf battery real specs,» 29 Januar 2018. [Internett]. Available: <https://pushevs.com/2018/01/29/2018-nissan-leaf-battery-real-specs/>. [Funnet 30 August 2019].
- [35] Wikipedia, «Solid State Battery Wikipedia,» [Internett]. Available: solid state battery news. [Funnet 2 September 2019].
- [36] M. S. Reisch, «Solid-state batteries inch their way toward commercialization,» Chemical & Engineering Neww, 20 Novemeber 2017. [Internett]. Available: <https://cen.acs.org/articles/95/i46/Solid-state-batteries-inch-way.html>. [Funnet 2 September 2019].
- [37] Toyota, «Slik virker fremtidens superbatteri,» [Internett]. Available: <https://www.toyota.no/world-of-toyota/articles-news-events/2018/superbatteri.json>. [Funnet 2 September 2019].
- [38] A. K. Ådnanes, «Maritime Electrical Installations And Diesel Electric Propulsion,» 2003.
- [39] Statistisk Sentralbyrå, «Bilparken,» [Internett]. Available: <https://www.ssb.no/transport-og-reiseliv/statistikker/bilreg>. [Funnet 29 August 2019].
- [40] Nikola motor, «Nikola motor homepage,» [Internett]. Available: <https://nikolamotor.com>. [Funnet 29 August 2019].
- [41] A. Carter, «World's first hydrogen train to be rolled out across Germany,» 05 Mai 2019. [Internett]. Available: <https://www.iamexpat.de/expat-info/german-expat-news/worlds-first-hydrogen-train-be-rolled-out-across-germany>. [Funnet 29 August 2019].
- [42] Norsk hydrogenforum, «Viking Line planlegger å bygge verdens første cruiseskip med hydrogendrift,» [Internett]. Available: <https://www.hydrogen.no/hva-skjer/aktuelt/viking-line-planlegger-a-bygge-verdens-forste-cruiseskip-med-hydrogendrift>. [Funnet 29 August 2019].
- [43] Norsk hydrogenforum, «Hydrogendrevet passasjer-hurtigbåt i Florø,» [Internett]. Available: <https://www.hydrogen.no/maritimt/undermeny-1-om-skip-her>. [Funnet 29 August 2019].
- [44] Wikipeda, «Proton Exchange Membrane Fuel Cell,» [Internett]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Proton-exchange_membrane_fuel_cell. [Funnet 29 August 2019].
- [45] M. Chediak, «The Latest Bull Case for Electric Cars: the Cheapest Batteries Ever,» December 2017. [Internett]. Available: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-12-05/latest-bull-case-for-electric-cars-the-cheapest-batteries-ever>.

[46] «electrek,» [Internet]. Available: <https://electrek.co/2019/04/14/tesla-gigafactory-1-battery-cell-production-issues-elon-musk/>.

[47] Ballard Power Systems, «Heavy Duty Modules,» 2019. [Internet]. Available: <https://www.ballard.com/fuel-cell-solutions/fuel-cell-power-products/motive-modules>.

APPENDIX