

Sammenligning av katamaranskrog. Bevegelsesdemping i bølger med aktiv baugfoil.

Petter Hieronymus Bergh Horgen
Carl Olav Øvreås

Bacheloroppgave i Marinteknikk
Bergen, Norge 2024



Sammenligning av katamaranskrog. Bevegelsesdemping i bølger med aktiv baugfoil.

Petter Hieronymus Bergh Horgen
Carl Olav Øvreås

Institutt for Maskin- og Marinfag
Høgskulen på Vestlandet
NO-5063 Bergen, Norge

Høgskulen på Vestlandet
Fakultet for Ingeniør- og Naturvitskap
Institutt for maskin- og marinfag
Inndalsveien 28
NO-5063 Bergen, Norge

Omslag fotografi © Norbert Lümmer

English title: *Comparison of catamaran hulls.
Motion damping in waves with active bow foil.*

Forfatter(e), studentnummer: Petter Hieronymus Bergh Horgen, 596180
Carl Olav Øvreås, 599080

Studieprogram: Marinteknikk
Dato: 05 2024
Rapportnummer: IMM 2024 - M33
Veileder ved HVL: Gloria Stenfelt, Torstein Frantzen
Oppdragsgiver: Maritime Engineering AS
Oppdragsgivers referanse: Audun Yrke

Antall filer levert digitalt: *ingen*

Forord

Denne bacheloroppgaven er et prosjekt ved Institutt for Maskin- og Marinfag (IMM) ved Høgskulen på Vestlandet (HVL). Oppdragsgiver for de to spesifikke problemstillingene er Maritime Engineering AS (MENG) med Audun Yrke som kontaktperson og ekstern veileder. Modellene som er benyttet eies og er produsert av MENG og Mundal Båt. Interne veiledere fra HVL har vært Gloria Stenfelt og Torstein Frantzen.

Under praksisperioden, som Petter hadde hos MENG høsten 2023, ble det uttrykt ønsker fra student og oppdragsgiver om en praktisk bacheloroppgave som kunne utføres i slepetanken ved MarinLab på HVL. Oppgaven ble i starten av 2024 konkretisert med tanke på bedriften og gruppens ønsker. Prosjektet inneholder to problemstillinger som går ut på tradisjonelle slepetester i stille vann og slepetester i bølger med en aktiv baugfoil.

Det har vært en lærerik prosess hvor gruppen har fått bruk for flere av sine opparbeidede kunnskaper fra tidligere fag ved ingeniørutdanningen i Marinteknikk. En stor takk til Maritime Engineering AS og Mundal Båt som har brukt tid og ressurser på produksjon av to nye skrog. Takk til våre veiledere, både interne og eksterne, for å ha bistått med kunnskap og råd underveis.



Sammendrag

Lengdebegrensningene innen fiskeindustrien resulterer i brede, høye og ustabile en-skrog båter. Alternativet til dette er stabile katamaranbåter som kan gi mye dekksplass og lastekapasitet med to skrog. Katamaranbåtene er meget stabile mot rullebevegelser, men kan oppleve mye stampebevegelser i møtende bølger. Det er derfor interessant å undersøke muligheten for å dempe disse bevegelsene samtidig som motstanden reduseres.

I denne eksperimentelle oppgaven er det benyttet to nedskalerte katamaranskrog av ulik lengde for å undersøke motstand og bevegelse i stille vann og bølger. Den lengste modellen, 21-meteren, slepes i stille vann for å sammenligne motstandskurven med den kortere 15-meteren som ble testet i fjor. Deretter slepes 15-meteren i bølger med en aktiv baugfoil for å undersøke om det er mulig å redusere stampebevegelsene og motstanden. Alle forsøkene utføres i slepetanken i MarinLab på Høgskulen på Vestlandet.

Slepetestene i stille vann ga en overaskende ulik motstandskurve sammenlignet med 15-meteren. Det observeres en kraftig økning i motstanden ved rundt 10 knop som skulle vært undersøkt nærmere. Slepetestene i bølger med aktiv baugfoil ga gode resultater i form av reduserte stampebevegelser og motstand. Hvor mye av dette som skyldes at baugfoilen var aktiv er det derimot vanskelig å si noe om, da utslagene på baugfoilen under forsøkene var mindre enn forventet.

Abstract

Due to length restrictions in the fishing industry, single-hull boats often become wide, tall, and unstable. As an alternative, stable catamarans offer substantial deck space and cargo capacity with their twin hulls. While catamarans are highly stable against rolling motions, they can experience significant pitching motion in head-on waves. Therefore, exploring ways to dampen these motions while reducing resistance is of great interest.

This experimental study utilizes two scaled-down catamaran hulls of different lengths to investigate resistance and motion in both calm water and waves. The longer model, a 21-meter catamaran, is tested in calm water to compare its resistance curve with that of a shorter 15-meter model tested last year. Thereafter, the 15-meter model is towed in waves equipped with an active bow foil to determine if it can reduce pitching motions and resistance. All tests are conducted in the towing tank at MarinLab, Western Norway University of Applied Sciences.

The calm water towing tests revealed a surprisingly different resistance curve compared to the 15-meter model. Notably, there was a sharp increase in resistance around 10 knots, which requires further investigation. The wave towing tests with the active bow foil showed promising results, reducing both pitching motions and resistance. However, it is difficult to determine how much of these improvements are due to the active bow foil, as the observed displacement of the bow foil during the tests were less significant than expected.

Innhold

Forord.....	VI
Sammendrag.....	VIII
Abstract.....	X
Nomenklatur.....	XIV
1. Innledning.....	1
2. Metode.....	2
2.1 Modellene.....	2
2.2 Teoretisk fremgangsmåte.....	3
2.2.1 Skalering.....	3
2.2.2 Motstandskomponenter.....	5
2.2.3 Motstandsberginger med Froudes metode.....	7
2.2.4 Foilteori.....	9
2.2.5 Bølge teori.....	11
2.2.6 Faseforskyvninger.....	12
2.3 Eksperimentell metode.....	13
2.3.1 Modelling og produksjon.....	13
2.3.2 21-meteren for stille vannskjøring.....	15
2.3.3 15-meteren for bølgekjøring.....	16
2.3.4 Testoppsett for stille vann og bølger.....	20
2.3.5 Fremgangsmetode og testmatrise.....	21
2.3.6 Feilkilder.....	24
3. Resultat.....	25
3.1 Sammenligning av 21 og 15-meteren i stille vann.....	25
3.2 15-meteren i bølger.....	27
4. Diskusjon.....	32
5. Konklusjon.....	32
6. Referanse.....	33
Liste over Figurer.....	35
Liste over Tabeller.....	37
Vedlegg – tabell og bilder.....	37

Nomenklatur

Skalering

λ , Skaleringsfaktor	L_s , Lengde for fullskala skip [m]
L_m , Lengde for modellskip [m]	S_s , Våt overflate for fullskala skip [m ²]
S_m , Våt overflate for modellskip [m ²]	V_s , Neddykket volum for fullskala skip [m ³]
V_m , Neddykket volum for modellskip [m ³]	F_N , Froude-tall
V_s , Hastighet for fullskala skip [m/s]	V_m , Hastighet for modellskip [m/s]
g , Tyngdeakselerasjon [m/s ²]	ρ , massetettheten [kg/m ³]
R_n , Reynoldstall	ν , kinematisk viskositet i [m ² s]
Δ_m , massedeplassment for modellskip [kg]	

Motstandskomponenter

C_F , Friksjonsmotstandskoeffisient	C_{Fm} , Friksjonsmotstandskoeffisient for modellskip
C_a , Korrelasjonskoeffisient	C_w , Bølgemotstandskoeffisient
C_{R_s} , Restmotstandskoeffisient for fullskala skip	C_{Rm} , Restmotstandskoeffisient for modellskip
C_{T_s} , Totalmotstandskoeffisient for fullskala skip	C_{Tm} , Totalmotstandskoeffisient for modellskip
C_{F_s} , Friksjonsmotstandskoeffisient for fullskala skip	R_{Tm} , Totallmotstand for modellskip
R_{T_s} , Totallmotstand for fullskala skip	

Foilteori

A , projisert areal [m ²]	C_L , Løftkraftkoeffisient
C_D , Dragkraftkoeffisient	F_D , dragkraft [N]
F_L , løftkraft [N]	c , kordelengde på foil [m]
α , angrepsvinkelen [°]	b , bredden på foil [m]

Bølgeteori

H , Bølgehøyde [m]	A , Amplitude av bølge [m]
λ , Bølgelengde [m]	T , Bølgeperiode [s]
h , vanndybde [m]	

Forkortelser

SWL, Sea Water Level (referansepunkt for vann uten bølger)

1. Innledning

Bakgrunnen for denne oppgaven baserer seg på en tidligere bacheloroppgave [1] og ulike ønsker fra MENG når det kommer til eksperimentelle forsøk av katamaranskrog i MarinLab. MENG og Mundal Båt jobber med et nybygg av en 15 meter katamaranfiskebåt bygget for snurrevadfiske. Under tegnings- og byggeprosessen ble det frest ut en modell av denne katamaranen som ble gitt til en bacheloroppgave [1] på HVL i fjor. Denne oppgaven undersøkte effekten av stampefinner når det kommer til drivstoffbesparelser og stampebevegelser. Det var lite forskjell mellom konfigurasjonene, og i de fleste tilfellene førte stampefinnene til økt drag. De beste resultatene oppsto ved den høyeste skipshastigheten på 13 knop. Her var det rundt 5% mindre motstand i utrustet kondisjon sammenlignet med uten stampefinner. Stampefinner i denne oppgaven referer til foiler som er formet som en halvsirkel ut fra begge sider av baugen.

En utfordring med baugfoiler eller stampefinner, sett fra et rent drivstoffbesparende perspektiv, er at de kun har en positiv effekt i bølger. Her har selskapet Wavefoil utviklet en mekanisme for uttrekkbare baugfoiler [2]. På denne måten kan man optimalisere besparelsene ved å trekke baugfoilene ut i høyere hastigheter med bølger og inn ved lavere hastigheter. Baugfoilene har også en dempende effekt på bevegelsene når fartøyet møter bølger. Wavefoil monterte i 2020 to uttrekkbare baugfoilmoduler på en 23 meters ambulansekatamaran med gode resultater (12-25% reduksjon) for bevegelsesdemping i fartøyets høye marsjart på 29,5 knop [3]. Det ble også målt 8% drivstoffbesparelse i snitt gjennom et år for en ferge Wavefoil leverte foiler til [2].

Grunnet lengdebegrensninger på fartøy i fiskeindustrien har katamaranbåter vist seg å være en god løsning sammenlignet med klumpete, høye og ustabile en-skrogbåter. Katamaranskrogene har meget god stabilitet mot rulling samtidig som bredden og to skrog gir god dekksplass og lastekapasitet. Katamaranskrogene er derimot ikke like behagelige i grov møtende sjø. Store bølger og store stampebevegelser kan gjøre at vannet mellom skrogene slår voldsomt opp i dekket, ofte kalt «slamming». For å unngå dette må stampebevegelsene dempes eller utformingen på undersiden av dekket modifiseres. Det er et ønske fra kunden som skal ta i bruk 15-meteren fra MENG og Mundal Båt at det undersøkes måter å redusere disse bevegelsene på [4].

Sammen med MENG har gruppen kommet fram til to problemstillinger som bygger videre på tidligere slepeforsøk med katamaranskrog og nytenking innen bruk av baugfoiler. Den første problemstillingen tar for seg en sammenligning av en ny forlengt modell opp mot den opprinnelige modellen som ble brukt i fjor. Her undersøkes det nærmere hvordan motstanden endrer seg ved en slik forlenging. Den andre problemstillingen undersøker om det er mulig å redusere stampebevegelsene og motstanden ved å bruke en aktiv baugfoil på tvers mellom skrogene.

Nøkkelspørsmål for problemstillingene:

- Hvordan ser motstandskurven ut for 21-meteren i forhold til 15-meteren?
- Ved hvilke hastigheter er det størst forskjell i motstanden mellom de to modellene?
- Hvor mye bevegelsesdemping i stamp oppnås med aktiv baugfoil?
- Blir motstanden lavere når stampebevegelsene dempes?

Problemstillingene skal undersøkes ved bruk av eksperimentelle metoder i MarinLab på HVL. Modellene vil bli slept gjennom tanken mens motstand og bevegelse blir målt på flere ulike måter. Forarbeid består av design, produksjon og testing av baugprofiler og utstyr. Når testene er fullført, skal dataen prosesseres og ulike beregninger gjøres for fullskala skip.

2. Metode

Denne seksjonen tar for seg modellene, teorien bak begge problemstillingene og det praktiske relatert til utførelsen av testene. Eksperimentell metode er valgt for denne oppgaven grunnet problemstillingenes kompleksitet. Det gjelder i særlig grad delen med baugfoil. Numeriske beregninger som CFD (Computational Fluid Dynamics) kan også brukes, men burde valideres ved faktiske forsøk. Analytiske metoder er ikke alene egnet for en slik oppgave da det ikke finnes eksakte matematiske ligninger som tar hensyn til kompleksiteten av strømningsbildet, ulike skrogformer og alle andre variabler som spiller inn under slike forsøk. Det er likevel benyttet analytiske metoder for skaleringsberegninger.

2.1 Modellene

Begge modellene er frest ut i Divinycell og deretter pusset og lakkert av Mundal Båt. Divinycell er et konstruksjonsmateriale som ofte brukes som kjernemateriale i sandwichkompositter mellom overflatelaminat eller glassfiber [5]. Mundal Båt spesialisere seg på å bygge fullskala fartøy i det de kaller FRP-Sandwichkompositt. Fordelene med denne kjerne- og komposittsandwichen er blant annet lettere vekt, god styrke og stivhet [6].

Fiskefartøyene ble i 2002 delt inn i 4 grupper basert på fartøyets lengde. Her tilhører 15-meteren gruppen fra 11-14.99 meter. Oppdragsgiver ønsker å sammenligne motstanden mellom 15-meteren og 21-meteren fordi den forlengede versjonen da tilhører neste gruppe fartøy, 15-20.99 meter [7].

15-meteren er en nedskalert modell av det pågående nybygget som skal brukes som fiskebåt i Lofoten. Hoveddimensjonene for 15- og 21-meteren finnes i Tabell 1 og Tabell 2. Figur 1 viser 15-meteren med alt utstyr montert for bølgekjøringer.

Dimensjon	Fullskala	Modell	Enhet
Lengde, L	14.95	1.2	[m]
Bredde, B	9.40	0.75	[m]
Deplasement, Δ_s	67541.06	33.63	[kg]
Våt overflate, S	128.85	0.8448	[m ²]
Dypgang, T	2.0625	0.165	[m]

Tabell 1: Hoveddimensjoner 15-meter fullskala fartøy i "utrustet kondisjon" [1]

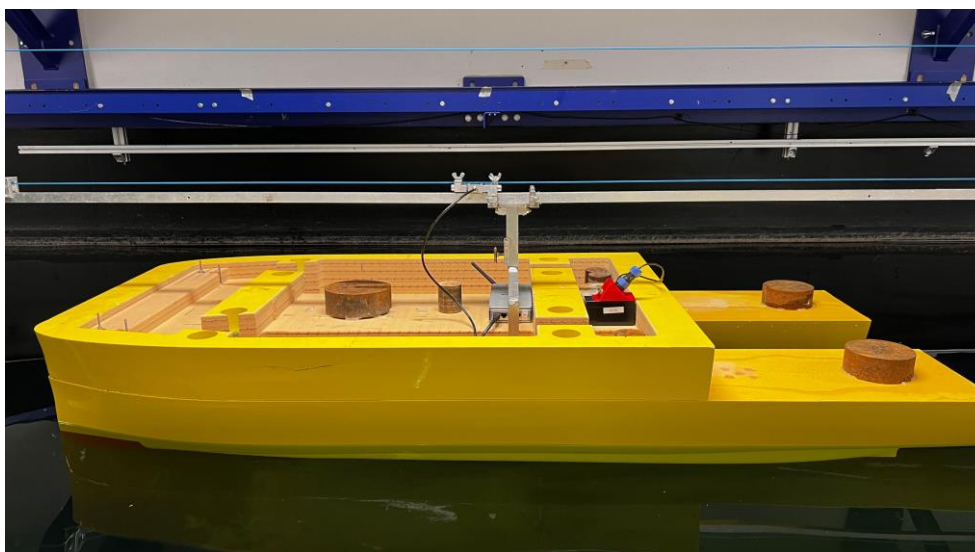


Figur 1 - 15-meteren i MarinLab med utstyr montert for bølgekjøringer.

Dimensjon	Fullskala	Modell	Enhet
Lengde, L	20.925	1.674	[m]
Bredde, B	9.40	0.75	[m]
Deplasement, Δ	106309	49.601	[kg]
Våt overflate, S	198.28	1.269	[m ²]
Dypgang, T	2.0625	0.165	[m]

Tabell 2 - Hoveddimensjoner 21-meter fullskala fartøy i "utrustet kondisjon".

Figur 2 viser 21-meteren som er en direkte forlengning av 15-meteren. Det er det samme dekket som brukes på begge modellene, kun skrogene som er forlenget.



Figur 2 – 21-meteren i MarinLab klar for stille vannskjøring.

2.2 Teoretisk fremgangsmåte

I dette kapittelet gjennomgås teorien som omhandler begge problemstillingene. Det presenteres en teoretisk tilnærming for å nedskalere fra fullskala skip til modell, utføre tester og deretter beregne seg tilbake til fullskala skip for å analysere kreftene. Videre undersøkes også hvordan reduksjon av skipets bevegelser kan oppnås ved bruk av en baugfoil.

2.2.1 Skalering

Skalering av fullskalaskip til modell gjøres ved å bruke skaleringsregler. Det er krav som må oppfylles for at fullskala skip og modell kan sammenlignes. Dette inkluderer at de må være likedannede i tre forskjellige parametere: form, dynamisk og kinematisk. Disse kriteriene kan ikke i praksis overholdes, men forenklinger blir gjort.

Geometrisk likedannet, er at modellen sin utforming er lik som fullskala skip. Skaleringsfaktoren er definert som λ , og forteller hvor mye modellen er skalert ned. Skaleringsfaktoren er enhetsløs og beregnes ved

$$\lambda = \frac{L_s}{L_m} \quad (1)$$

Her L_s er lengden for fullskala skip og L_m er lengden for modell. Her står s for fullskala skip og m for modell. Disse benevningene vil bli brukt videre i rapporten.

Korresponderende hastigheter finner man ved å bruke likhet i Froude tall. For at hastigheten skal bli riktig, er det viktig at Froude tallet er lik for både modell og skip.

$$F_n = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (2)$$

Her er g tyngdeakselerasjonen og V er hastigheten. Når F_n er likt for både fullskala skip og modell, gjøres det forkortelser slik at korresponderende hastighet blir beregnet slikt

$$V_m = \frac{V_s}{\sqrt{\lambda}} \quad (3)$$

Våtoverflate er arealet som er under vannoverflaten. Denne kan hentes ut med ved

$$S_m = \frac{S_s}{\lambda^2} \quad (4)$$

Her er S definert som våt overflate.

Arkimedes lov er et prinsipp som brukes til å beregne neddykket volum av et legeme nedsenket i en væske. Dette prinsippet tar hensyn til vekten av væsken som legemet fortrenger, noe som er kjent som massedeplassment. Neddykket volum, også kjent som volumdeplassment og representerer den mengden væske som legemet fortrenger når det senkes ned i væsken [8].

$$V_m = \frac{\Delta_m}{\rho} \quad (5)$$

$$\lambda^3 = \frac{V_s}{V_m} \quad (6)$$

Her massedeplassment Δ , massetettheten er ρ og volumdeplassment er V [9].

For at modellen skal være kinematisk likedannet med fullskala skipet, må de ha samme orientering i væskestrømmen. Strømningen må være lik for modell og skip, og for skipet vil det være turbulent strømning. Modellen kan oppnå laminær strømning, noe som fører til at den ikke er kinematisk likedannet. Faktorer som gjør at dette oppstår, er at modellen blir kjørt på lavere hastigheter og har mindre størrelse. For å unngå dette brukes "turbulensstimulering". Dette kan for eksempel være å teipe på sandpapir eller å pusse overflaten slik at den oppnår større overflateruhet [10] [11].

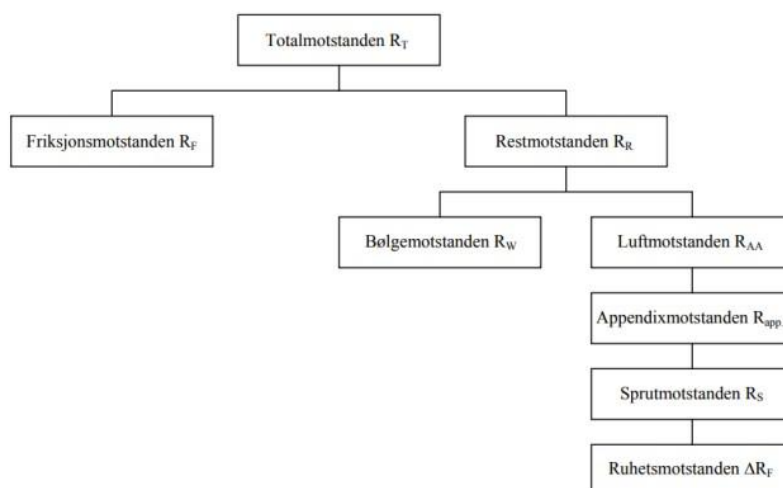
Dynamisk likhet krever at ulike kraftforhold er like mellom modell og skip. Dette innebærer at det må være likhet i dimensjonsløse verdier som Froude tall, Reynolds tall, Eulers tall og Webers tall. Det er imidlertid ikke praktisk mulig å tilfredsstille alle disse kraftforholdene samtidig. Den beste tilnærmingen er å ha likhet i Froude tall, som resulterer i likt bølgeomønster mellom skipet og modellen. Ettersom man da ser bort fra noen kraftforhold mellom modellen og skipet, indikerer likhet i Froude tall at det er likhet i bølgeomotstanden. Dermed kan denne overføres direkte fra modellen til skipet [12] [11]. Reynolds tall (R_n) er gitt ved

$$R_n = \frac{VL}{\nu} \quad (7)$$

Her er ν kinematisk viskositet, denne verdien blir funnet i tabell etter temperaturen er målt [13].

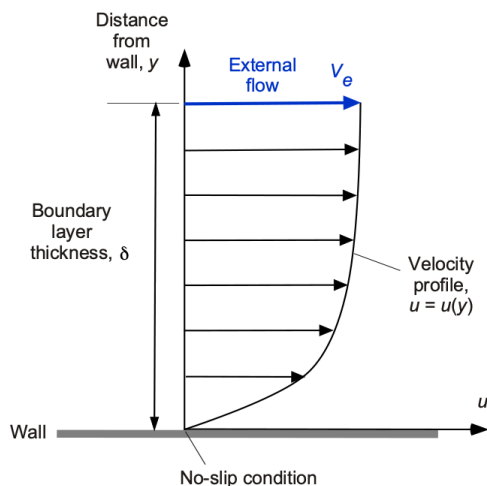
2.2.2 Motstandskomponenter

Motstandskomponentene er delt inn i to hoveddeler: friksjonsmotstand og restmotstand. Dette gjøres for å gi bedre innsikt i hvordan de fungerer individuelt i forhold til skipet. I beregningene av motstandskomponentene benyttes dimensjonsløse koeffisienter. Ved å summere alle disse motstandskomponentene kan man videre beregne totalmotstanden, som er den kraften som motvirker skipets bevegelse gjennom vannet [14]. Figur 3 illustrerer fordelingen av de forskjellige motstandskomponentene.



Figur 3 – Viser fordelingen av motstands komponentene [15].

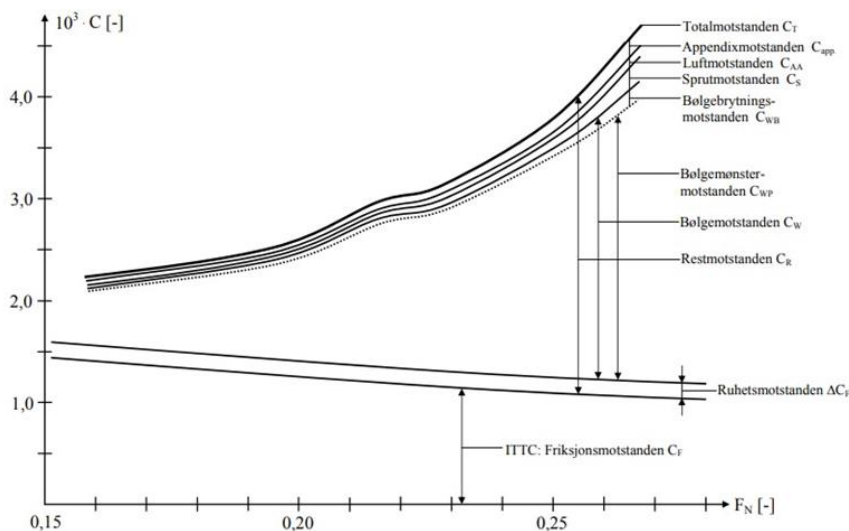
Friksjonsmotstand påvirker bevegelsen til et skip i vann. Den oppstår når skipet er i bevegelse og vannpartiklene som ligger inntil skroget opplever "non-slip condition", noe som betyr at vannpartiklene fester seg og ikke har noen relativ hastighet i forhold til skipet [15]. Dette fører til at vannet nær skroget får en hastighetsprofil hvor vannpartiklenes hastighet varierer med avstanden fra skroget. Denne variasjonen i hastigheter skaper en skjærkraft langs skrogoverflaten [16]. Figur 4 illustrerer "non-slip condition", og viser hvordan hastigheten er 0 når den er inntil skroget og har en økende hastighet ut fra skroget til den er i uberørt strømning.



Figur 4 - Illustrasjon av hastighetsprofil på en overflate [17].

Restmotstand: Denne motstanden består av flere komponenter, inkludert bølgeomotstand, luftmotstand, appendiksmotstand, sprutmotstand og ruhetsmotstand. Her utgjør bølgeomotstanden den største delen og oppstår når skipet forskyver vannet og lager bølger. Da overføres energien fra skipet til dannelsen av bølger [15].

Figur 5 viser et eksempel på hvordan motstandskoeffisientene er fordelt med hensyn til Froude tall. Disse koeffisientene blir forklart og fremvist ved hjelp av formler i neste delkapittel.



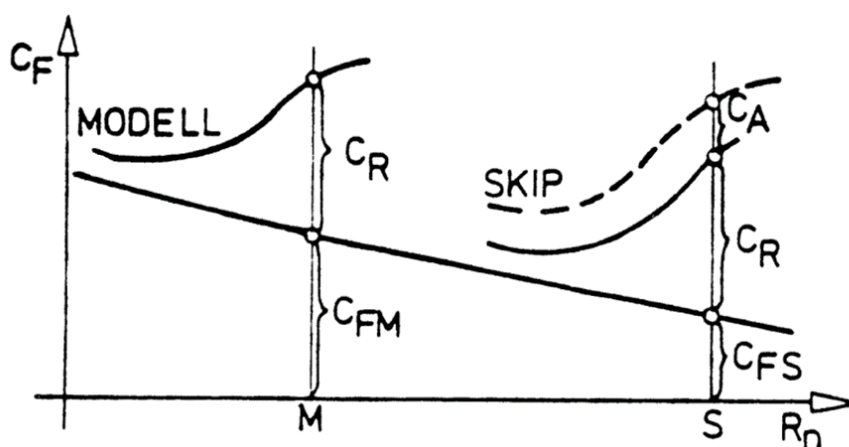
Figur 5 – Illustrerer hvordan motstandskoeffisientene varierer med Froudes-tall [15].

2.2.3 Motstandsberginger med Froudes metode

Froudes metode er en tilnærming som bruker sammenhenger mellom modell og skip som er geometrisk likedannet med samme Froude-tall. Dette medfører at modell og skip har samme bølgedannelse, noe som gir grunnlag for å anta likheten i bølgemotstanden for modell og skip. Dette gjør at bølgemotstandskoeffisienten C_w kan settes lik for modell og skip [15]. Videre består restmotstanden hovedsakelig av bølgemotstand. Denne antagelsen gjør at hele restmotstanden antas å være lik for både skip og modell. Figur 6 illustrerer hvordan dette fordeler seg mellom modell og skip. Forklaringen på C_a vil komme senere i delkapittelet [18]. Med dette blir

$$C_{Rm} = C_{Rs} \quad (8)$$

Her restmotstandskoeffisient for modellskip er C_{Rm} og restmotstandskoeffisient for fullskala skip C_{Rs}



Figur 6 - Viser R_e opp mot motstandskoeffisientene [18].

Internasjonal Slepetank konferanse (ITTC) har en metode som viderefører Froudes tilnærming, og blir ofte nevnt som Froudes forbedrede metode (ITTC-57). I henhold til denne metoden deles motstandskomponentene inn i to grupper, slik det forklares i 2.2.2. Det blir da gjort etter retningslinjene for ITTC-57-metoden [19]. ITTC-57 bruker empiriske formler. Dette vil si at de er utviklet basert på observasjoner og eksperimentelle data, uten å være avledet fra teoretiske prinsipper eller matematiske modeller. Dette gjør at det er mulig å finne friksjonsmotstandskoeffisienten [19] ved hjelp av

$$C_F = \frac{0,075}{(\log_{10}(R_n) - 2)^2} \quad (9)$$

Her friksjonsmotstandskoeffisienten er C_F .

Når modellkjøringen er gjennomført, blir totalmotstanden for modell hentet ut, og dette gjør at man kan beregne totalmotstandskoeffisienten for modellen med

$$C_{Tm} = \frac{R_{Tm}}{\frac{1}{2} \rho_m S_m V_m^2} \quad (10)$$

Her er totalmotstand for modellen R_{Tm} og totalmotstandskoeffisienten for modellen C_{Tm}

Videre kan restmotstandskoeffisienten beregnes ved å bruke koeffisientene som ble funnet av formlene i (9) og (10)

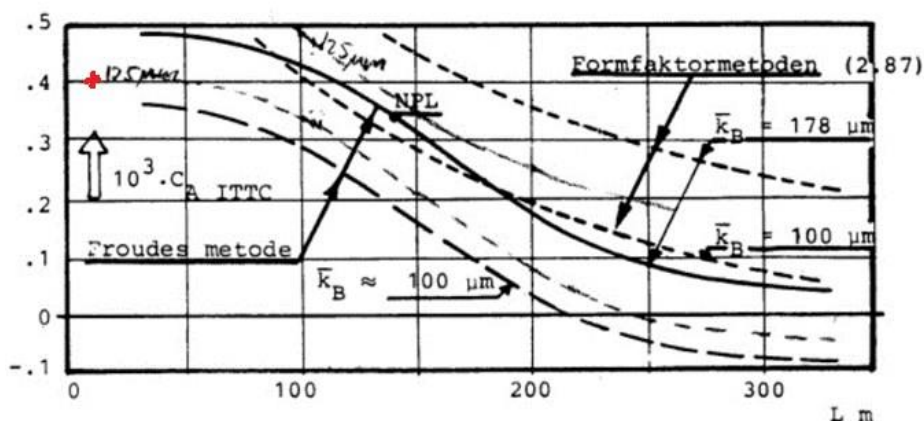
$$C_{Rm} = C_{Tm} - C_{Fm} \quad (11)$$

Her restmotstandskoeffisienten for modell er C_{Rm}

Fra formel (8) blir totalmotstandskoeffisienten C_{Ts} for skip funnet ved

$$C_{Ts} = C_{Fs} + C_{Rm} + C_a \quad (12)$$

Her er korrelasjonskoeffisient C_a som brukes for å redusere avviket mellom beregnet totalmotstand for et skip og den faktisk målte totalmotstanden for skipet. Dette skyldes flere faktorer, inkludert feil i estimatet for overflateruhet, samt metoden for omregning. Disse og flere faktorer gjør det nødvendig med en korrelasjonskorreksjon. Valg av C_a tar hensyn til geometriske faktorer og skipets overflateruhet. Nybygde skip har overflateruhet på 125 og markert på 21- meter som vist i Figur 7 [20] [15].



Figur 7 - Korrelasjons koeffisienten hentes ut med punktet som er markert i rødt [21]

Beregning av totalmotstand for fullskala skip gjøres slikt

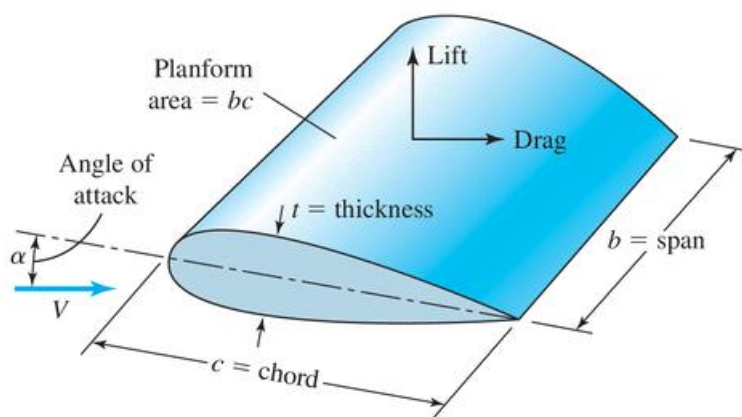
$$R_{Ts} = C_{Ts} \frac{1}{2} V_s^2 S_s \rho_s \quad (13)$$

Her er totalmotstand for fullskala skip R_{Ts} .

2.2.4 Foilteori

Hvor en foil plasseres på et skipskrog har stor betydning for dens effekt. Foilen utnytter bølgeenergi for å generere løft og nedoverkraft, og dette gjør det mulig å skape fremdrift. Foilen plasseres derfor slik at den møter bølgen i baugen på skipet. Dette er for å optimalisere utnyttelsen av bølgeenergien [2].

Når foil beveger seg gjennom vannet, dannes det trykkfordelinger rundt foilen. Dette er hovedkomponenten til generering av løft. For en symmetrisk foil, når den har en angrepsvinkel α på 0 grader, vil trykkfordelingen være lik på over- og undersiden. Da opplever foilen ingen løftekraft, men en dragkraft. Når angrepsvinkelen endrer seg i en positiv retning, vil trykkfordelingen endre seg, og det blir høyere trykk på undersiden av foilen og lavere trykk på oversiden. Dette resulterer i en oppadgående kraft som virker normalt på innkommende strømming [22]. Figur 8 viser en illustrasjon av positiv angrepsvinkel, innkommende strømming, løftekraft, dragkraft, bredden og kordelengden av en foil.



Figur 8 - Viser noen av parameterne på en foil [23]

Formelen for løftekraft og dragkraft blir skrevet likt bare med endring i koeffisient slik som dette

$$F_L = \frac{1}{2} \rho A V^2 C_L \quad (14)$$

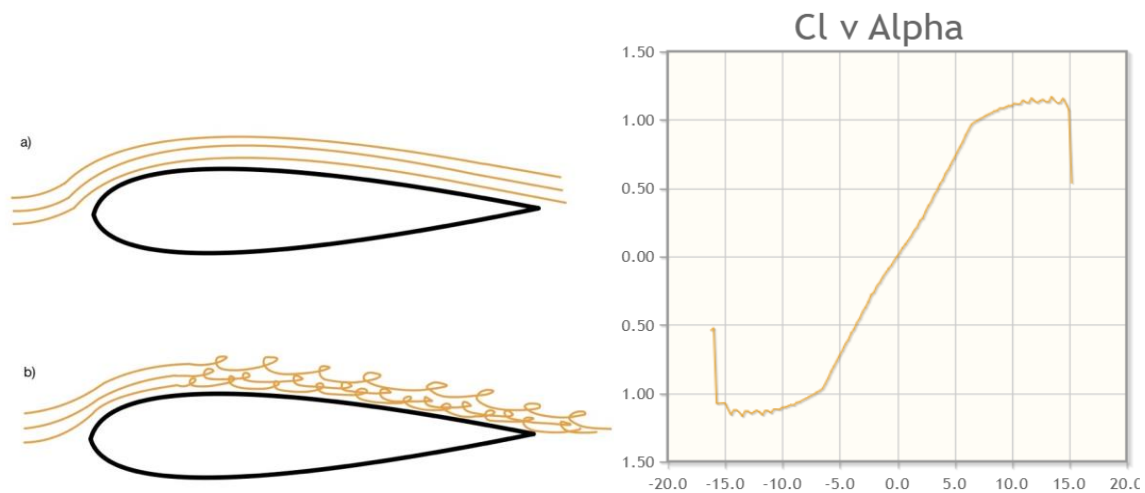
$$F_D = \frac{1}{2} \rho A V^2 C_D \quad (15)$$

$$A = cb \quad (16)$$

Her representerer A projiserte arealet sett ovenfra, der c er kordelengde og b er bredden på foilen. Her C_L står for løftekraftkoeffisienten og C_D , som representerer dragkraftkoeffisienten. Dette er dimensjonsløse koeffisienter. Kraften blir da F_L eller F_D ut fra hvilken koeffisient som brukes [24]. Det er viktig å nevne at hastigheten er den relative. Når foilen beveger seg i bølger, blir denne hastigheten både vertikal og horisontal, og den resulterende hastigheten er summen av begge disse komponentene.

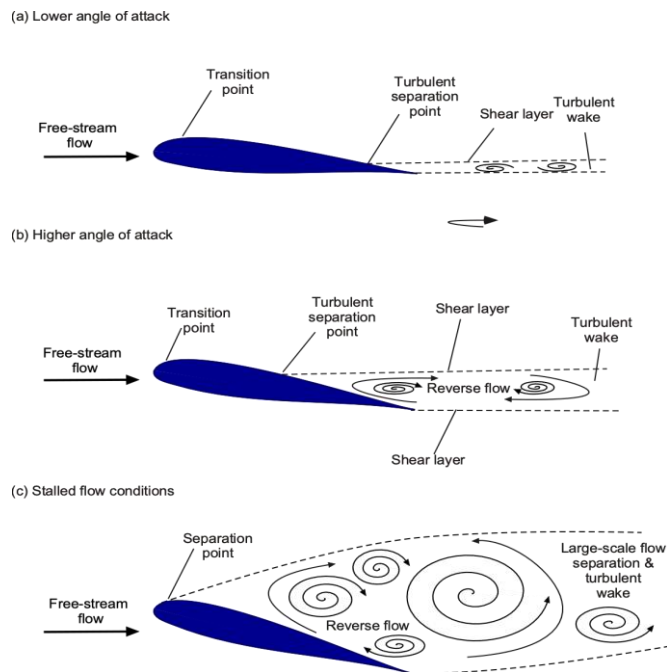
Demping av bevegelse: Foilen kan roteres i ønsket retning for å påvirke kraftretningen. Dette skaper en dempende effekt da foilen kan motvirke den eksisterende kraften, og dermed redusere den totale kraften skipet opplever. Når båten beveger seg gjennom bølger, blir den påvirket av bølgekraften, noe som kan føre til uønskede svingninger. Foilen kan brukes til å motvirke denne bevegelsen, og dermed redusere båtens bevegelser [2]. Det er viktig å være oppmerksom på at foilen ikke har stor effekt når skipet er i ro eller beveger seg med lav hastighet, da innstrømmingen rundt foilen er liten og det kan ikke genereres betydelig mengde løftekraft [25].

Reynolds tallet (Rn) er en dimensjonsløs parameter som brukes til å karakterisere strømningsregimet til en væskestrøm rundt et objekt. Med et høyere Rn tall indikerer dette mer turbulent strømming. Fullskala skip og foil er i turbulensområdet, og det er da viktig at testene som blir gjort også er i turbulensområdet. [26]. Basert på praktisk erfaring og forsøk, er $Rn = 100\ 000$ en erfaringsbasert verdi som gir en god tilnærming for turbulent strømming når eksperimenter gjennomføres [4]. Figur 9 a) og b) illustrerer laminær og turbulent strømming rundt en foil. Figur 9 c) viser angrepsvinkel opp mot C_L ved $Rn = 100\ 000$. Rett før de vertikale linjene, oppstår separasjon [27].



Figur 9 - (a) laminær strømming og (b) turbulent strømming (c) c_l mot angrepsvinkel for NACA0021 [28]

Separasjon av strømning kan oppstå når foilen får stor angrepsvinkel. Dette fenomenet oppstår når vannstrømmen over foilen ikke beveger seg raskt nok til å holde seg festet til overflaten på grunn av trykkforskjeller. Når dette skjer, oppstår det en situasjon der vannstrømmen løsner fra foilen og skaper økt turbulens. Denne turbulensen fører til redusert løftekraft og økt dragkraft [17]. Figur 10 visualiserer hvordan dette oppstår på en foil.



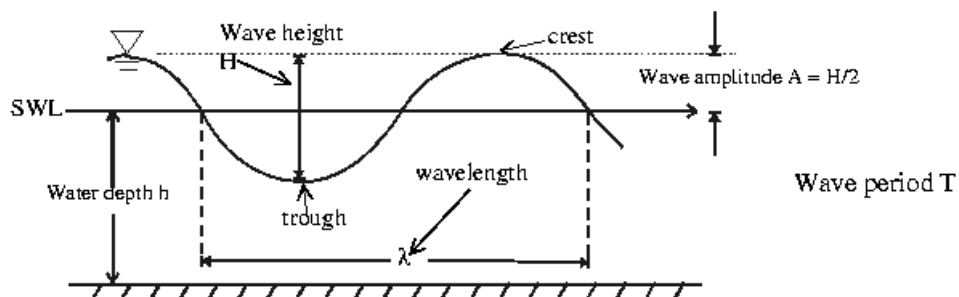
Figur 10 - Økende angrepsvinkel gir tidligere separasjons punkt på foil [17].

Foilprofiler av typen NACA MPXX innebærer parametere som beskriver krumming og tykkelse. Her representerer M maksimal krumming, delt på 100. P angir posisjonen til denne krummingen, som en tidel av kordelengden, og XX står for maksimal tykkelse som en prosentandel av kordelengden. Den maksimale tykkelsen oppstår vanligvis ved rundt 30 % av kordelengden fra forkanten av foilen [29].

2.2.5 Bølgeteori

Bølger deles inn i to grupper: regulære bølger og irregulære bølger. Forskjellen er at regulære bølger følger en sinus kurve og har en svingning med samme høyde og avstand fra topp til topp. Irregulære bølger har varierende høyder og avstander mellom bølgetoppene og representerer ulike sjøtilstander. Når man observerer havet, vil det ikke være konstante bølger som ligner på sinus bølger. Derfor er det blitt utviklet flere forskjellige bølgespekter som tilnærmer sjøtilstandene på ulike steder i havet. JONSWAP (Joint North Sea Wave Project) er et slikt spekter som brukes [30].

Definisjonen av en bølge kan enkelt gjøres ved å se på Figur 11 som illustrerer hvordan disse parametrene er fordelt og hvilken betydning de har



Figur 11 - Bølge parametre [31].

Som vist i Figur 11, er h vanddybden, H er bølgehøyden, A er amplituden som er halve bølgehøyden, λ er bølgelengden, og T er perioden som forteller hvor mange sekunder det tar før bølgen går fra en topp til den neste. SWL står for "Sea Water Level" og er referansepunktet til vann uten bølger [31].

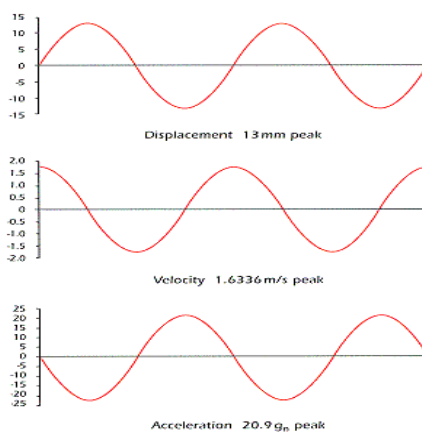
Når bølgen har en periode som samsvarer med skipets egenfrekvens, kan dette føre til en betydelig respons fra modellen, og det kan oppstå resonans. Det er viktig å være oppmerksom på dette, da det kan føre til store bevegelser og krefter [32].

Montering av en aktiv baugfoil kan redusere risikoen for resonans, og den arbeider for å motvirke skipets naturlige egenfrekvens [2]. Hvis foilen skulle slutte å fungere og havne i en låst posisjon, er det viktig at skipets ikke øker risikoen for resonans. Dette er fordi vekten av skipet og annet utstyr kan påvirke egenfrekvensområdet.

2.2.6 Faseforskyvninger

Faseforskyvninger beskrives i grader eller i radianer, her blir det valgt å bruke grader innenfor området fra 0 til 360. I denne sammenhengen representerer 0 og 360 grader samme posisjon. 180 grader representerer svingninger i motfase, som innebærer at når en er på sitt toppunkt, er den andre på sitt bunnpunkt [33]. Motfase blir viktig når man skal se på posisjon, hastighet og akselerasjon. Da disse har en naturlig faseforskyvning mot hverandre.

Figur 12 viser hvordan faseforskyvningen virker med posisjon, hastighet og akselerasjon, der posisjon er 90 grader i forhold til hastighet og 180 grader i forhold til akselerasjon [34].

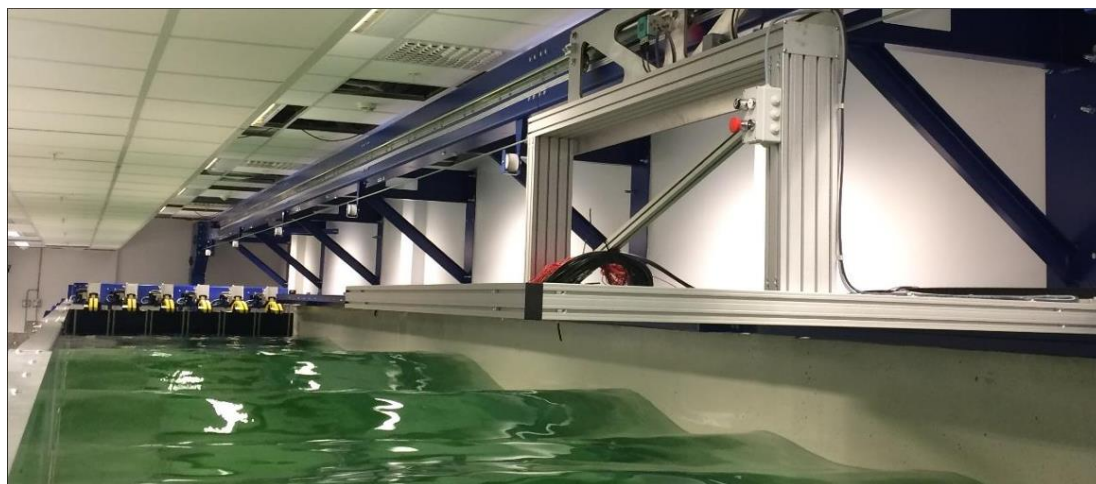


Figur 12 - Faseforskyvning av posisjon, hastighet og akselerasjon [35].

2.3 Eksperimentell metode

Eksperimentell metode går ut på utføre fysiske eksperimenter for å få svar på spørsmålene man har rundt en problemstilling. Dette kapitlet tar først for seg hvordan baugprofilene og foil ble produsert. Deretter en gjennomgang av de to modellene med det nødvendige utstyret som trengs for vellykkede slepeforsøk i stille vann og bølger. Videre presenteres alt eksternt utstyr som er brukt, samt testmatrise og feilkilder.

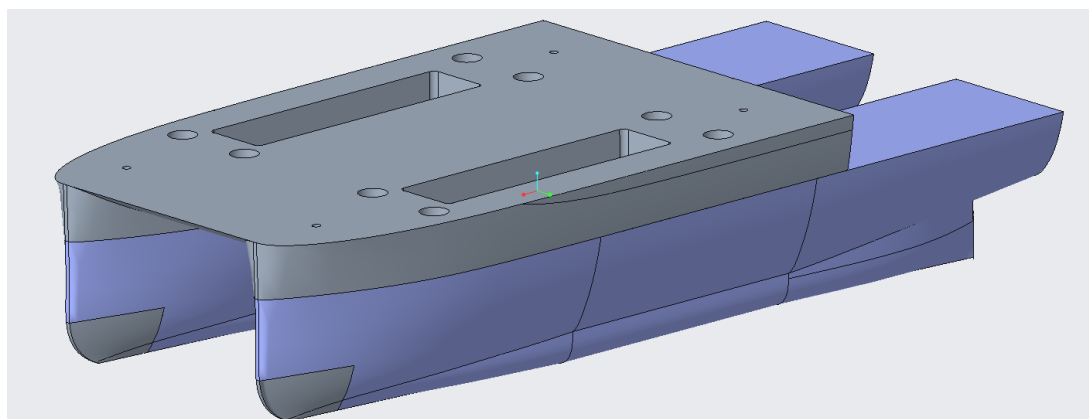
MarinLab er en slepetank som kan brukes til flere problemstillinger knyttet til flytende konstruksjoner enten det gjelder forankring, strømminger, bølger eller konstant hastighet gjennom vannet, se Figur 13. Tanken er 50 m lang, 3 m bred og 2.2 meter dyp. MarinLab er utstyrt med en fullautomatisert bølgemaskin fra Edinburgh Design og en slepevogn med maksimal hastighet på 5 m/s. Bølgemaskinen kan generer både regulære og irregulære bølger [36]. I denne oppgaven blir MarinLab brukt for å utføre slepetester både i stille vann og bølger.



Figur 13 – MarinLab [37]

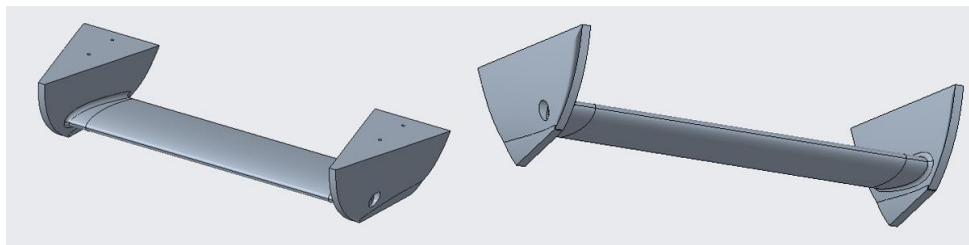
2.3.1 Modellering og produksjon

Begge skrogparene er levert fra Mundal Båt uten baugprofiler slik at det lettere kan monteres forskjellige konsepter for baugprofiler med og uten foiler. Figur 14 viser 21-meteren i en STEP-fil som er sendt fra MENG.



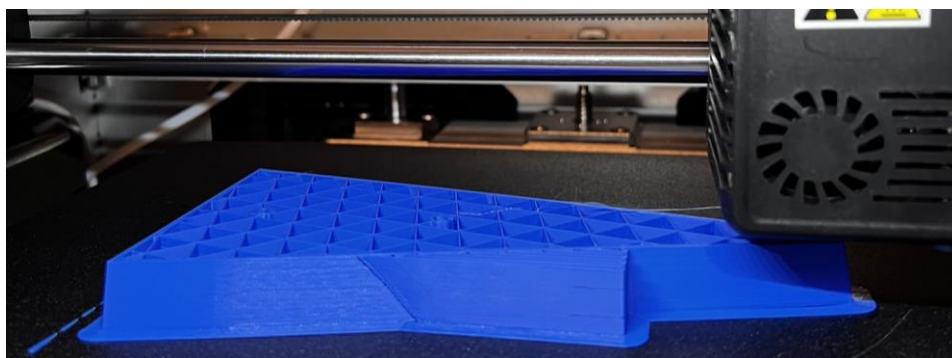
Figur 14 – STEP-fil av 21-meteren i Creo Parametric. Her kan man se at både dekket og baugprofilene kan demonteres fra skrogparene.

Ulike ideer ble diskutert for hvordan den aktive baugfoilen skulle monteres og fungere i praksis. Sluttresultatet ble en 3-delt foil mellom baugprofilene som er tredd på en firkantprofil i aluminium, som igjen er festet med en M8 bolt på hver side av baugprofilene. På denne måten kan foilene rotere fritt og man kan enkelt skifte ut foilene hvis det skulle oppstå komplikasjoner eller feil. Hver baugprofil blir også bygget litt ut for å unngå at den aktive foilen kolliderer med baugprofil eller skrog ved ekstreme angrepsvinkler. En modifisert gjengestang vil være bindeleddet mellom servoen på dekk og den aktive foilen. Figur 15 illustrerer den aktive baugfoilkonfigurasjonen.



Figur 15 – Den aktive baugfoilkonfigurasjonen modellert i CAD.

Sammen med veileder fra MENG ble det valgt en symmetrisk foilprofil av typen NACA-0021. Koordinatene til foilprofilen ble lastet inn i CAD og deretter 3D-printet på HVL i 3D-laben som vist i Figur 16. Her ble også baugprofilene, støttemateriale til servo og andre smådeler printet. Det ble lagt ned mange timer til modellering og produksjon før den endelige løsningen var god nok. Tabell 3 viser hoveddimensjonene til baugfoilen. Kordelengden ble valgt for å få Reynolds tall i størrelsesorden 100 000.



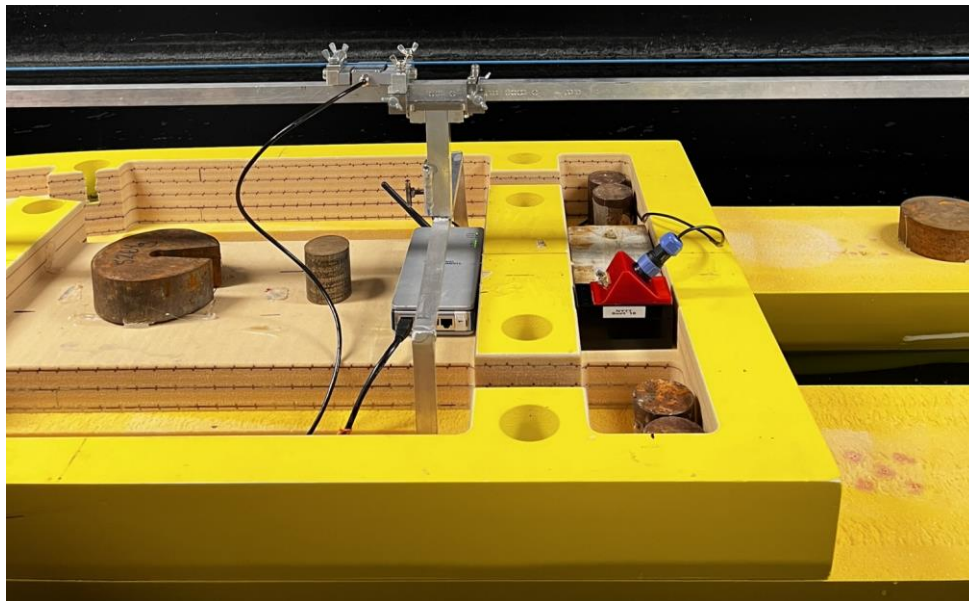
Figur 16 – 3D-print av den første baugprofilen. Verdt å nevne at baugprofilene ble produsert stående i tiden etter.

Dimensjoner baugfoil	[mm]
Kordelengde	85
Bredde (mellom skrog)	382
Max tykkelse (ved 30% kordelengde)	17.85
Foilstart til foilens rotasjonssenter	25
Akterspeil til rotasjonssenter	1591
Vannlinje til rotasjonssenter	153

Tabell 3 – Hoveddimensjoner for baugfoilen mellom skrogene på 15-meteren.

2.3.2 21-meteren for stille vannskjøring

Som tidligere nevnt i metodekapittelet brukes det to modeller i denne oppgaven. Den nyeste modellen, 21-meteren, brukes til slepetester i stille vann for å kartlegge motstandskurven over de aktuelle hastighetene og sammenligne dette med den kortere, 15-meteren, fra i fjor. Dette utføres med tradisjonelle bauger, uten foiler. I forsøkene for stille vann trengs det lastcelle, wifi-modul og et batteri. Wifi-modulen sender direkte data fra lastcellen og til datamaskinen som brukes i MarinLab. Dette utstyret har en vekt som tas hensyn til når modellen ballasteres til valgt dypgang. Figur 17 viser plasseringen av batteri og Wifi-modul, samt ballasteringsvektene. Lastcellen er montert på slepearmen med svart kabel fra wifi-modul og vil bli forklart nærmere i neste delkapittel. Figur 18 viser 21-meteren sett forfra.



Figur 17 – Wifi-modul og batteri på 21-meteren for stille vannskjøring.



Figur 18 – 21-meteren sett forfra med tradisjonelle bauger.

For mest mulig representativ sammenligning mellom modellene ble det bestemt at 21-meteren skulle ha samme dypgang som 15-meteren hadde i «utrustet kondisjon» i fjor. Dette er en lastkondisjon som tilsier at båten er utstyrt med alt utstyr som trengs for fiske, men uten noen form for last. For å få til dette ble det markert opp samme dypgang på 21-meter skrogene som på 15-meteren. Deretter ble 21-meteren ballastert med vekter til dypgangen var korrekt med null trim- og krengevinkel. Relasjonen mellom ballast og totalvekt kan beregnes ved,

$$\Delta_{ballast} = \Delta_{m,total} - \Delta_{skrog} - \Delta_{utstyr} \quad (17)$$

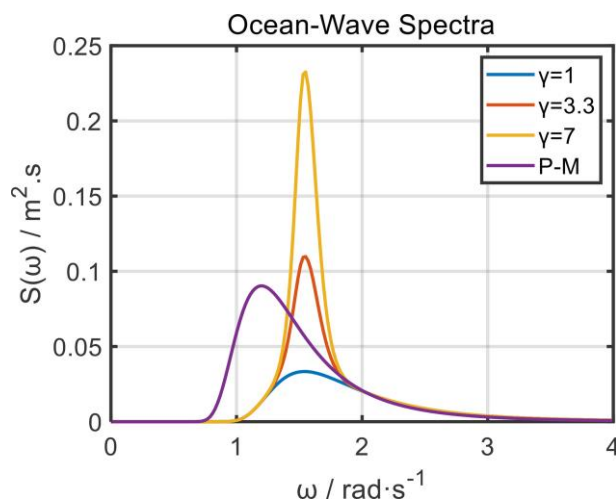
Tabell 4 viser alle variablene i formelen over, hvor baugene inngår skrogvekten. Alle baugprofilene har ligget neddykket i vann flere dager før bruk for å unngå vektforskjeller. Disse vektforskjellene kan oppstå grunnet unøyaktighet i 3D-printingen hvor noen deler er mer motstandsdyktig mot vanngjennomtrengning enn andre.

21-meteren	[kg]
Skrog og dekk	22.500
Ballast "utrustet kondisjon"	26.336
Tradisjonelle bauger (fylt med vann)	0.765
Batteri og Wifi-modul	1.233
$M_{totalvekt}$	50.834

Tabell 4 – Ballastering og vekt av utstyr på 21-meteren.

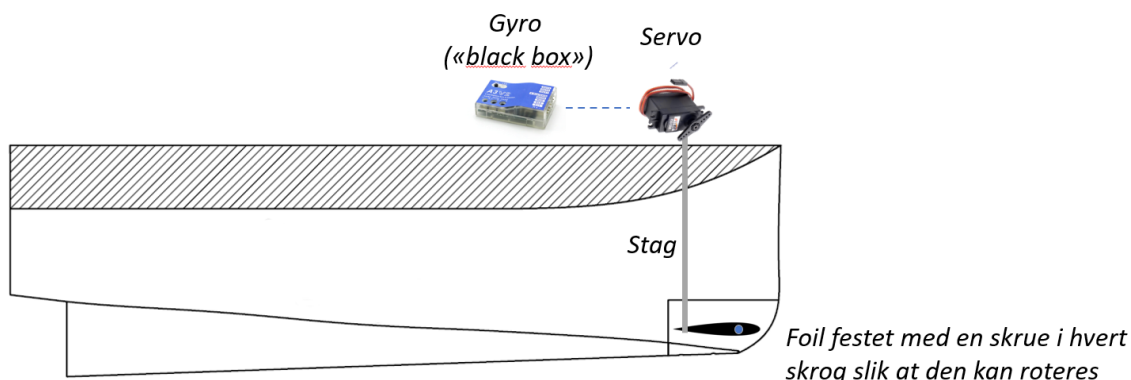
2.3.3 15-meteren for bølgekjøringer

For den andre problemstillingen brukes 15-meteren både uten og med foiler i slepeforsøk med bølger. I dette delkapittelet forklares det hvordan konfigurasjonen med aktiv baugfoil fungerer og hva slags utstyr som benyttes for å lese ut motstand, foilvinkel og modellens stampevinkel. Bevegelsene i alle frihetsgradene blir overvåket ved hjelp av markører på dekk og et kamerasystem. Fullskala skip skal operere i Norskehavet, så for å oppnå representative resultater blir modellen slept i irregulære JONSWAP bølger med en modifisert gamma på 5 som gir et spissere bølgespekter enn ved standarden på 3.3. Figur 19 illustrerer hvordan ulike gamma-verdier påvirker bølgespekteret. Dette ble gjort for å øke antall bølger innenfor det interessante frekvensområdet.



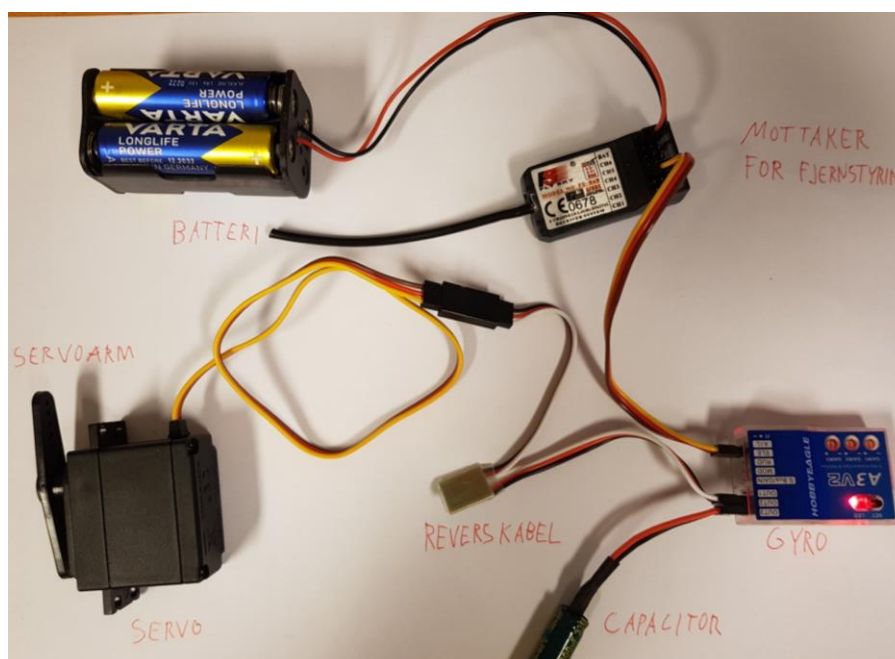
Figur 19 – JONSWAP bølgespekter ved ulike gamma-verdier [38].

En bevegelsesmåler, heretter omtalt som gyro, representerer båtens vinkelhastighet i stamp og sender signaler videre til en servo som kontrollerer foilens vinkel via en servoarm og gjengestag [4]. Disse gyroene brukes mest i modellfly for å korrigere en plutselig kursendring ved f.eks. vindkast [39]. I denne oppgaven vil det ikke bli lagt vekt på hvordan dette systemet fungerer. Gyroen er hyllevare og det eneste som kan justeres er «gain». «Gain» blir ofte beskrevet som forsterkningen av et utgående signal i forhold til det inngående signalet [40]. I dette tilfelle vil en høyere «gain» gi et større utslag på servoen. Figur 20 viser en illustrasjon av oppsettet med gyro, servo og baugfoil. Servoen er også hyllevare og har en kapasitet på 15kg med en arm på 10mm. For å være sikker på at servoen gir nok utslag på baugfoilen forlenges armen til 100mm.



Figur 20 – Illustrasjon av oppsettet med gyro, servo og baugfoil [4].

Figur 21 viser hvordan komponentene er koblet sammen.

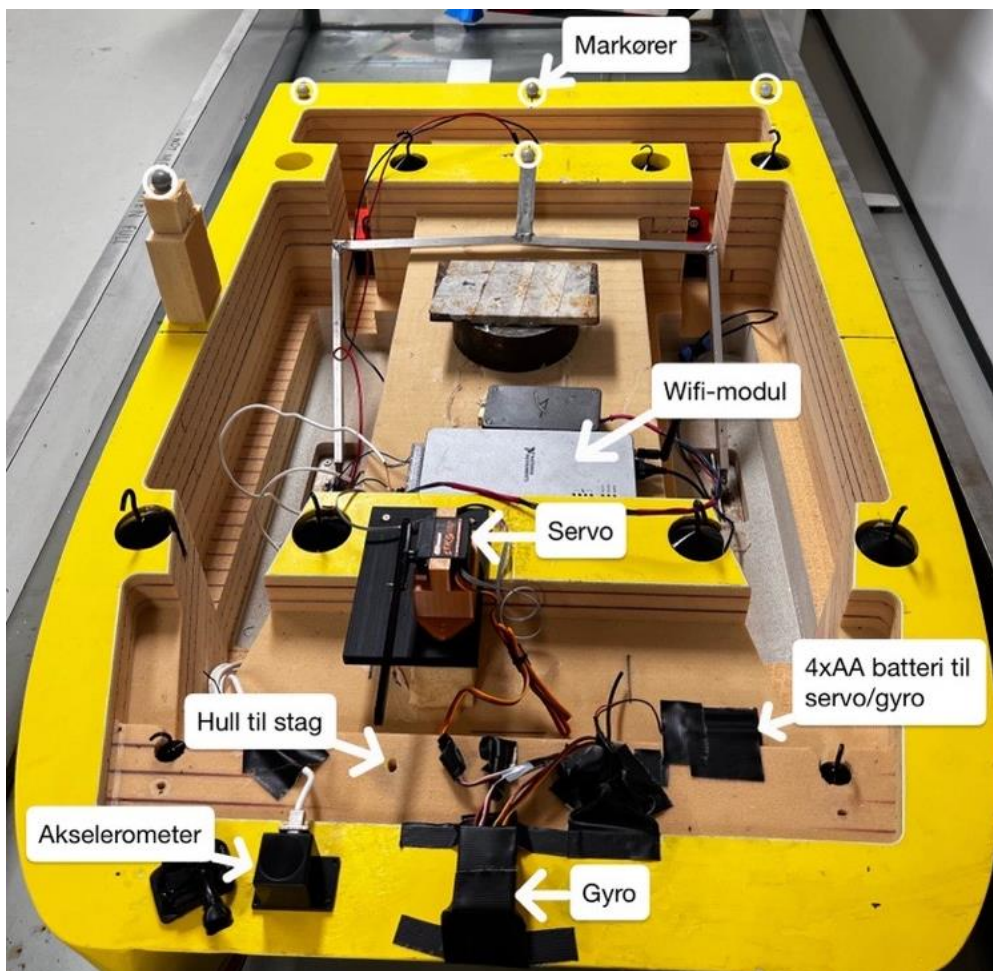


Figur 21 – Oppsettet med gyro, servo og batteri [4].

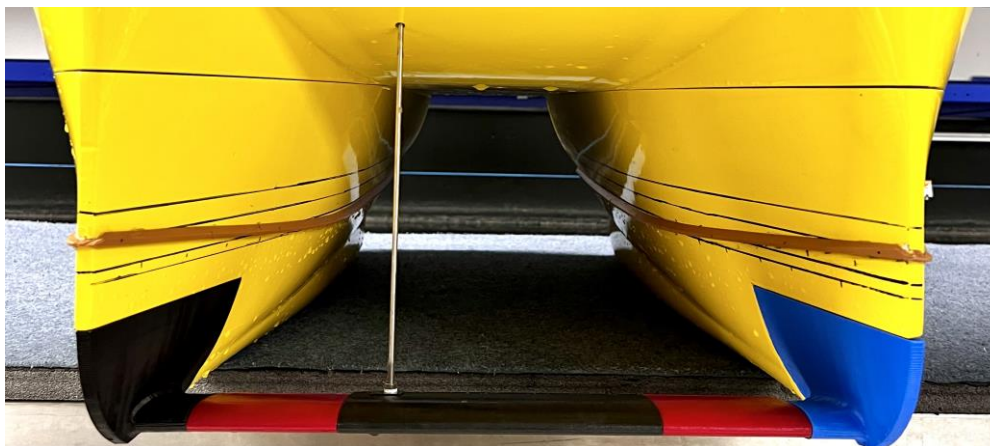
For å lese ut foilvinkel under kjøringene måtte veilederne ved MarinLab bistå med sin kompetanse for å få ut spennings signalet fra servoen og konvertere dette til grader av angrepsvinkel på foilen. For å kartlegge sammenhengen mellom angrepsvinkel og målt spenning, kalibreres angrepsvinkelen på foil opp mot spenning og noteres ned i et regneark for å undersøke om det gir en lineær tilnærming.

Et akselerometer er plassert helt frem i baugen for å gi en ekstra måling av bevegelse. Det er et lineært instrument som måler vertikal akselerasjon. Denne er ferdig kalibrert og viser 1g eller $9.81[m/s^2]$ når modellen står i ro. I det modellen møter bølger og baugen går opp og ned vil akselerometeret gi ut verdier over og under 1g avhengig av om akselerasjonen og retningen er mot eller med tyngdekraften.

Figur 22 og Figur 23 viser henholdsvis hvor utstyret er plassert og båten sett forfra.



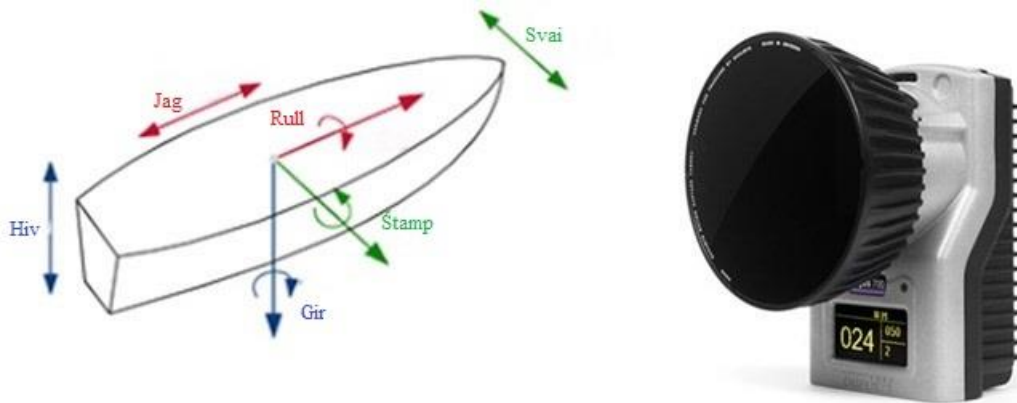
Figur 22 – Oversikt over alt utstyr som trengs for bølgekjøringer med 15-meteren.



Figur 23 – 15-meteren sett forfra med aktiv baugfoil konfigurasjon.

For å måle bevegelsene i de seks frihetsgradene benyttes det et kamerasystem av typen Qualisys Oqus 5 series [41]. Det er totalt fire kameraer som er plassert strategisk slik som vist i Figur 27. Kameraene har en samplingfrekvens på opptil 180Hz ved normal oppløsning.

Av de seks frihetsgradene er det stampebevegelsene som er mest aktuell for denne oppgaven. Stampebevegelser er rotasjon rundt y-aksen eller tverraksen av båten [42]. Figur 24 a) viser de 6 frihetsgradene og Figur 24 b) viser kameraet som er brukt.



Figur 24 a) og b) – De seks frihetsgradene [42] og ett av Qualisys kameraene [41].

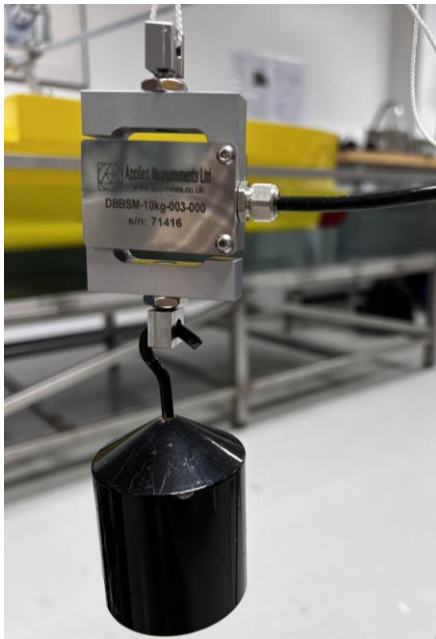
15-meteren blir ballastert til en dypgang som tilsvarer «utrustet kondisjon». Informasjon om vektene finnes i Tabell 5.

15-meteren	[kg]
Skrog og dekk	20.300
Ballast "utrustet kondisjon"	12.565
Tradisjonelle bauger (fylt med vann)	0.765
Batterier, Wifi, Gyro, Servo etc...	1.733
Mtotalvekt, 21-meteren	35.363

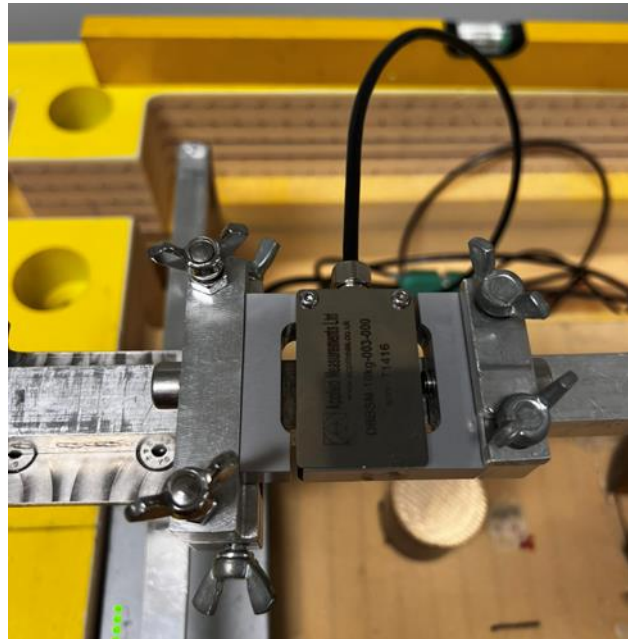
Tabell 5 - Ballasting og vekt av utstyr på 15-meteren.

2.3.4 Testoppsett for stille vann og bølger

Lastcellen som brukes i både stille vannskjøringene med 21-meteren og bølgekjøringene med 15-meteren har en kapasitet på 100N. Før den kan tas i bruk må den kalibreres. Dette gjøres ved å henge lastcellen slik som i Figur 25 og deretter henge på vekter i en bestemt rekkefølge. Deretter tas vektene av igjen i samme rekkefølge og alle verdiene skrives inn i et ferdiglagd kalibreringsscript i MATLAB. Dette scriptet gir da ut en korreksjonsverdi basert på alle differansene mellom når vektene ble lagt på og tatt av igjen. Denne korreksjonsverdien er viktig for nøyaktigheten til motstandsmålingene i hver kjøring. Figur 25 viser lastcellen montert på slepearmen. Her vil slepetråden festes under de to vingemutterne til høyre for lastcellen.

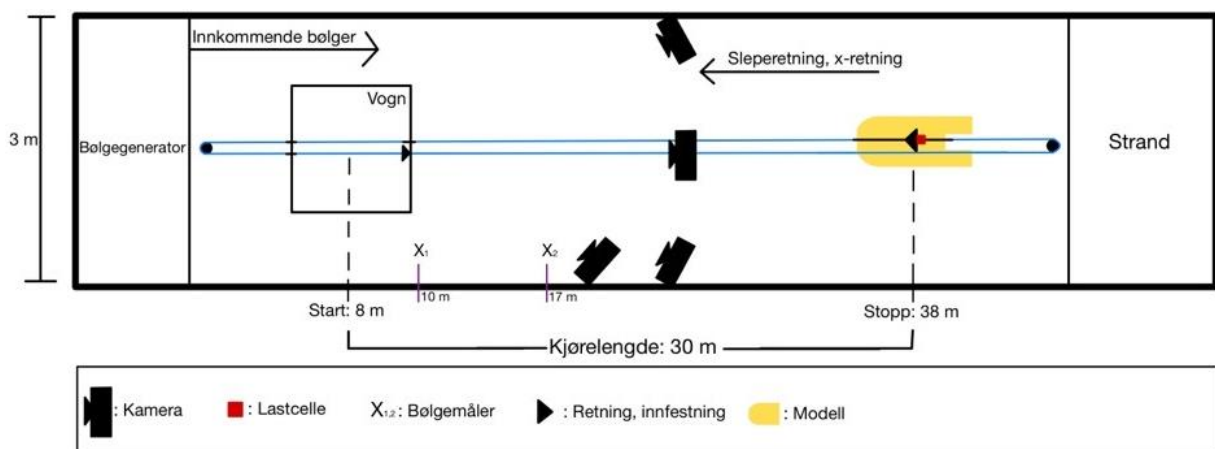


Figur 25 – Kalibrering av lastcelle



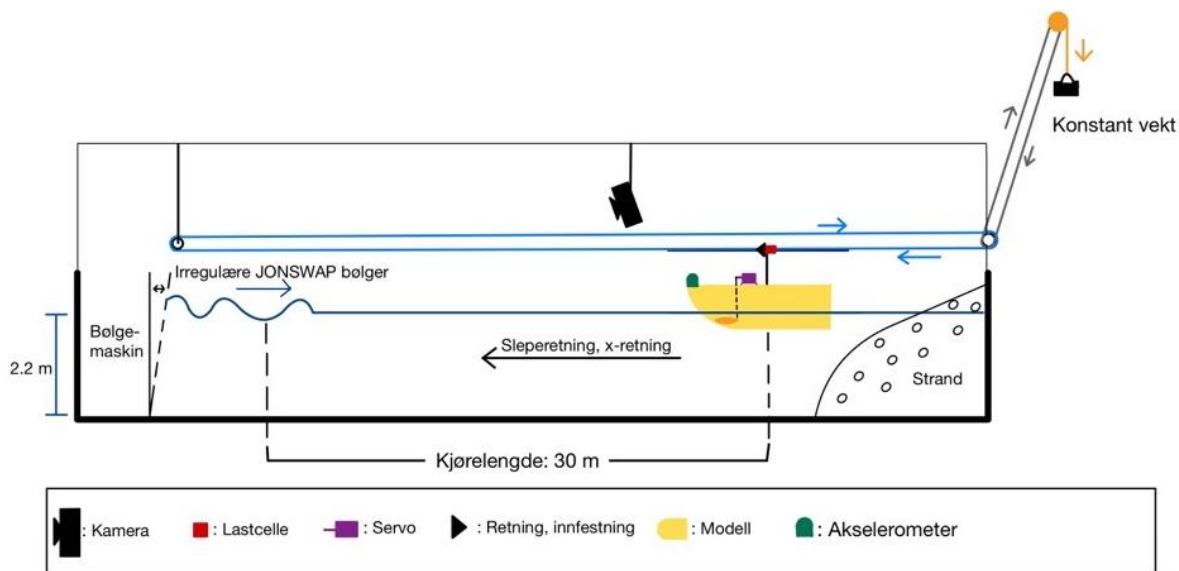
Figur 26 – Lastcelle montert

Under slepeforsøkene i stille vann blir 21-meteren slept gjennom tanken ved hjelp av slepevognen og en slepetråd som går rundt en trinse i hver ende av tanken. Vognen og modellen plasseres i hver sin ende av tanken slik at ønsket kjørelengde oppnås med gode sikkerhetsmarginer. Med dette oppsettet slepes modellen med konstant fart. Figur 27 viser en illustrasjon av oppsettet sett ovenfra.



Figur 27 – Testoppsett for stille vannskjøring med 21-meteren.

Den store forskjellen i testoppsettet mellom stille vannskjøring og bølgekjøring er hvordan den modellen blir slept. For bølgekjøringene benyttes ikke vognen, men et vektsystem som gir modellen konstant slepekraft. Dette gir en mer realistisk tilnærming til hvordan fartøy oppfører seg i møtende sjø med konstant propulsjonskraft. Hastigheten vil derfor til tider variere ut ifra hvor modellen befinner seg i bølgen. Vektsystemet har en utveksling på omtrent 7.5. Det vil si at slepekraften på modellen er 7.5 ganger mindre enn kraften som vektene utgjør. Figur 28 illustrerer hvordan vektsystemet fungerer i MarinLab.



Figur 28 – Testoppsett for bølgekjøring med 15-meteren sett fra siden.

2.3.5 Fremgangsmetode og testmatrise

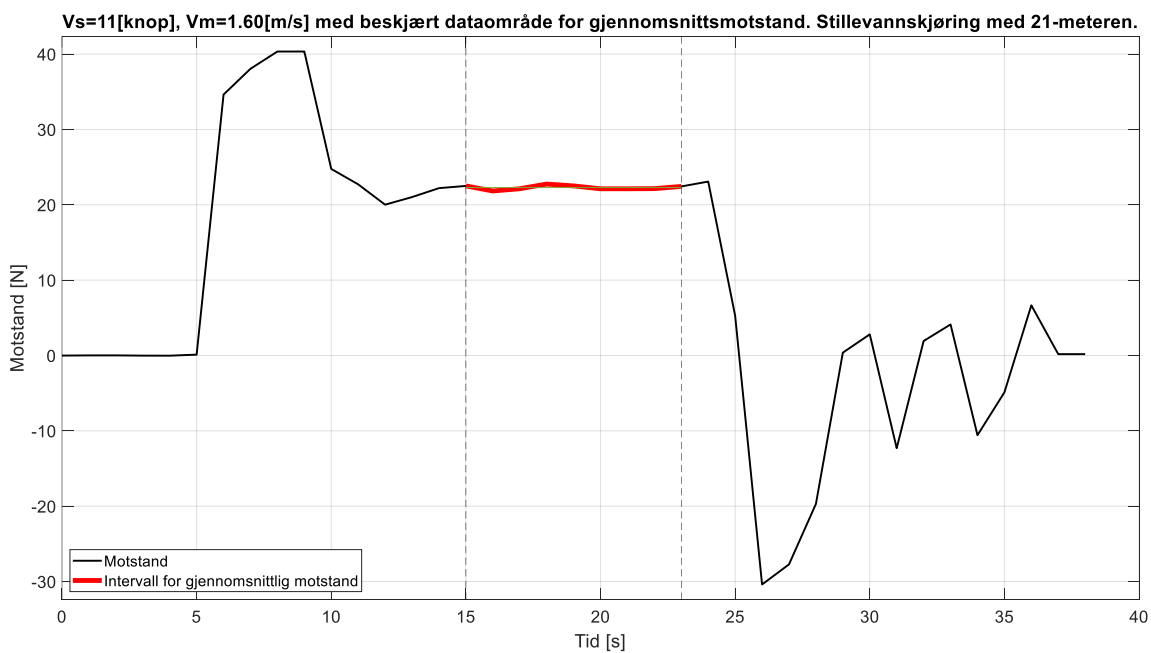
Modellene ballasteres til den ønskede dypgangen og fulladede batterier kobles til måleinstrumenter, Wifi-modul og annet utstyr. Lastcellen kalibreres én gang før stille vannskjøringene og én gang før bølgekjøringene. Det kontrolleres i LabView, som er programmet på datamaskinen i MarinLab, at alle måleinstrumenter er tilkoblet og at Wifi-modul har kontakt. Deretter settes den aktuelle modellen i tanken og festes til det aktuelle slepesystemet. Rett før hver kjøring korrigeres lastcellen til 0 slik at motstandsmålingene under kjøringene blir mer nøyaktige. For stille vannskjøringene er det viktig at det ikke er bølger eller merkbar bevegelse i vannet når hver kjøring settes i gang. Det ventes derfor 10-20 minutter mellom hver kjøring, avhengig av slepehastigheten. For bølgekjøringene er ikke dette like viktig, men det ventes fortsatt 5-10 minutter mellom hver kjøring for å være mest mulig konsekvent. For bølgekjøringene startes bølgemaskinen noen sekunder før modellen slippes. Dette gjøres for at modellen skal møte de ønskede bølgene gjennom hele kjøringen. Opptak av lastcelle- og Qualisysdata startes i det modellen slippes. For stille vannskjøringene startes kun opptaket av lastcelldata i det kjøringen begynner.

Tabell 6 viser testmatrisen for stille vannskjøringene. Hver hastighet blir kjørt tre ganger for å validere motstandsmålingene. Deretter tas det et gjennomsnitt av disse målingene. Det er valgt de samme hastighetene som fjorårets kjøring for å kunne sammenligne de to modellene.

Froude (Fn)	Skipshastighet V_s [Knop]	Modellhastighet V_m [m/s]	Run 1 [N]	Run 2 [N]	Run 3 [N]	Gj. snitt [N]
0.14	4	0.58	TBD	-	-	-
0.21	6	0.87	-	-	-	-
0.28	8	1.16	-	-	-	-
0.35	10	1.45	-	-	-	-
0.39	11	1.60	-	-	-	-
0.43	12	1.75	-	-	-	-
0.46	13	1.89	-	-	-	-

Tabell 6 – Testmatrise for stille vannskjøringene med 21-meteren. Det tok to hele dager i MarinLab å gjennomføre alle kjøringene.

Figur 29 viser hvordan motstandsverdien fra hver kjøring er hentet ut. Det tas et gjennomsnitt i det intervallet hvor modellen har oppnådd sin konstante fart og motstandsmålingene er mest stabile. Det røde området indikerer intervallet.



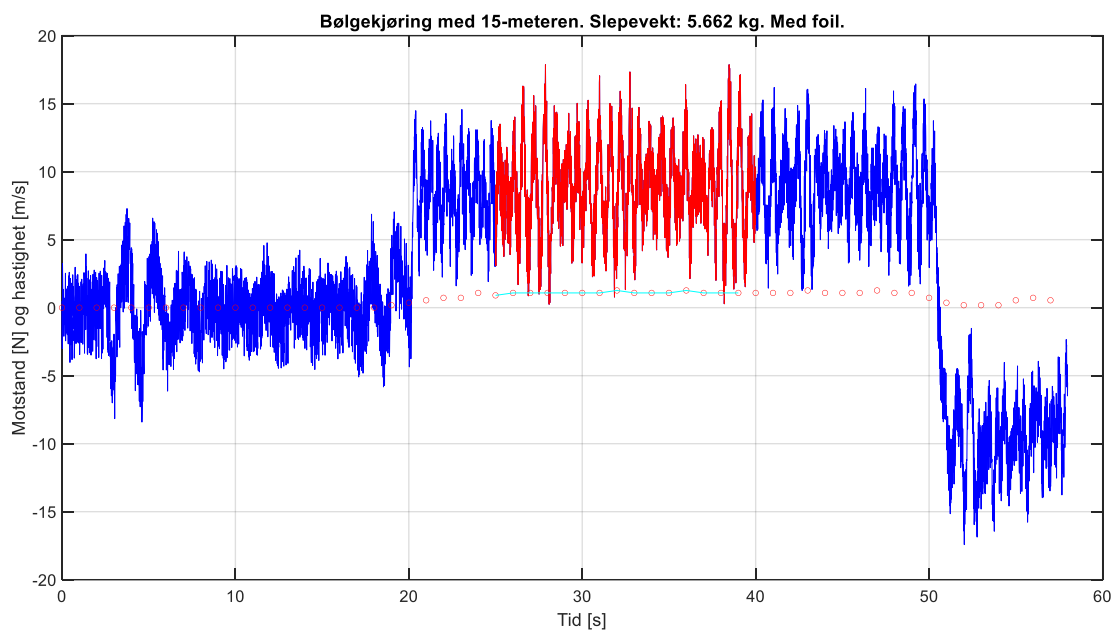
Figur 29 – Viser hvordan gjennomsnittsmotstand er hentet ut fra kjøringene.

Tabell 7 viser parameterne for bølgekjøringene med 15-meteren. Det ble gjennomført totalt 16 kjøring, 4 for hver konfigurasjon med ulik slepevekt.

Konfigurasjon	Slepevekt [kg]	Slepekraft [N]	JONSWAP
Med & uten baugfoil	5.662	7.406	$H_s = 0.085\text{m}$, $T_p = 1\text{s}$, $\gamma=5$
Med & uten baugfoil	2.378	3.110	$H_s = 0.085\text{m}$, $T_p = 1\text{s}$, $\gamma=5$

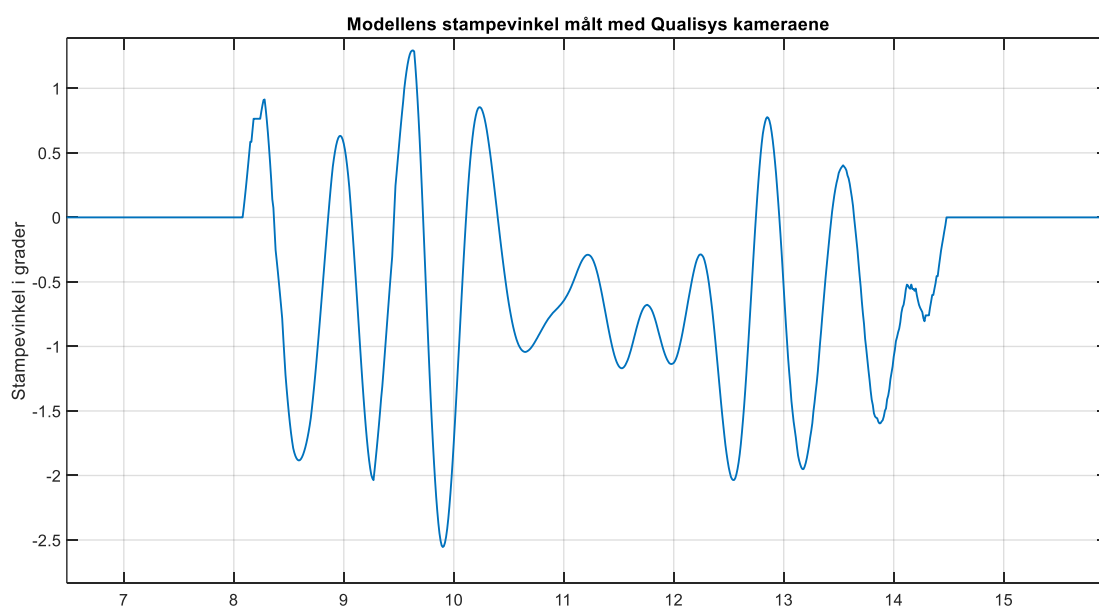
Tabell 7 – Parametere for bølgekjøringene.

Figur 30 viser data fra en bølgekjøring med 15-meteren. Det røde intervallet indikerer beskjæringsområdet for gjennomsnittlig motstand og hastighet.



Figur 30 - Ufiltrert data fra en typisk bølgekjøring med 15-meteren.

Figur 31 illustrerer en måling av stampevinkel fra Qualisys kameraene under en vilkårlig bølgekjøring.



Figur 31 – Viser måledata med stampevinkel fra Qualisys kameraene under en typisk bølgekjøring.

2.3.6 Feilkilder

For å kunne slepe modellen ble den festet i slepearmen, til hvilket et slepetau ble skrudd fast. Slepetauet måtte strammes for å hindre at modellen gikk sidelengs eller roterte. Imidlertid førte denne strammingen av tauet til en reduksjon i modellens frihetsgrader. For å avgjøre om denne reduksjonen var betydelig, burde en seakeeping-test ha blitt utført for å sammenligne. Det antas imidlertid at påvirkningen på stamper, den viktigste frihetsgraden i forsøket, var liten.

Treghetsmomentene og flotasjonssenteret ble ikke tatt hensyn til, da disse dataene ikke var tilgjengelige. Dette betyr at bevegelsen til modellen ikke kan sammenlignes direkte med fullskala skip, siden det ikke er mulig å vite om flotasjonssenteret har flyttet seg oppover eller nedover. Vekten kan ha blitt plassert for langt opp eller ned, noe som påvirker stabiliteten og bevegelsen til båten.

Det ble brukt en digital vinkelmåler for å kalibrere foilvinkel. Imidlertid ble det brukt feil metode, da staget som ble målt vinkelen på, var for lite, noe som resulterte i unøyaktige målinger. Dermed er vinkelmålingene på foil bare tilnærminger og ikke nøyaktige. Dette skyldes at under kalibreringen kunne vinkelen hoppe med opptil $\pm 1.5^\circ$, noe som utgjør et betydelig avvik når den er i ro. Dessuten ble ikke vinkelmåleren kalibrert før bruk, noe som burde ha blitt gjort.

Staget for å styre foilene ville ikke være til stede på et fullskalaskip, noe som representerer en motstandsfaktor som ble oversett. Imidlertid ble staget slipt ned for å oppnå en jevnere flate i forsøkene og redusere denne motstanden. Det er likevel viktig å merke seg at denne kraften er til stede og vill påvirke resultatene i en liten grad.

Tabell 8 viser nøyaktigheten til måleutstyr og 3D-printer.

Utstyret som er benyttet	Nøyaktighet \pm	Benevning
Diesella Digital vinkel måler	0.2	°
Qualisys kamera	5	mm
Termometer	0.1	c°
Adventurer 4 3D printer	0.1	mm (Print Precision)
Lastcelle	<1	% (Rated Output)
Lastcelle Hysteresis	0.086	% (Rated Output)

Tabell 8 – Nøyaktigheten til måleutstyr og printer

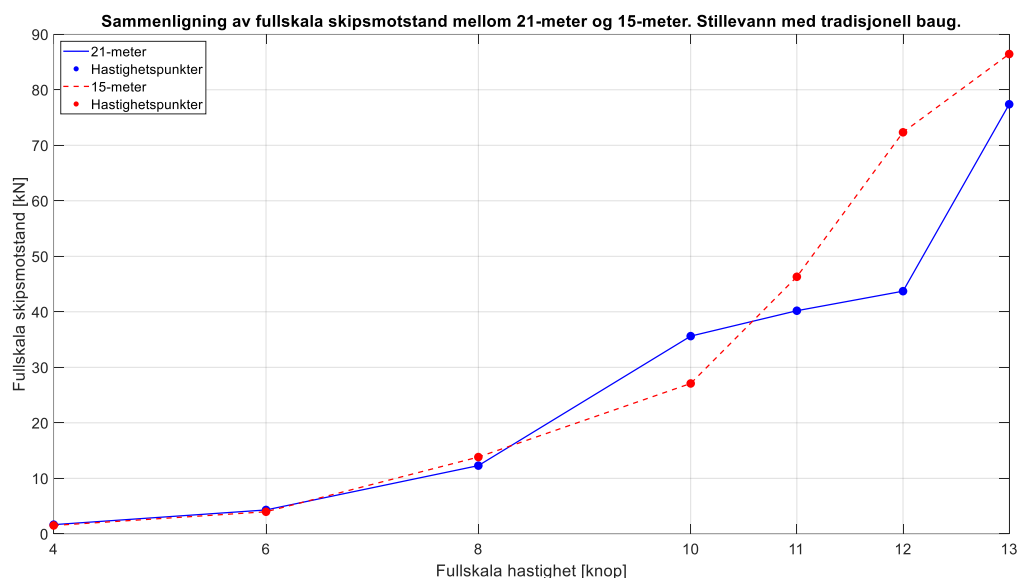
3. Resultat

I denne seksjonen presenteres resultatene for de to problemstillingene i hvert sitt kapittel. Dataene fra begge forsøkene er prosessert i MATLAB og fremstilt for sammenligning.

3.1 Sammenligning av 21 og 15-meteren i stille vann

Kapittelet inneholder resultatene fra stille vannskjøringene mellom de to modellene. Resultatene for 15-meteren er hentet ut fra fjorårets oppgave med tilhørende tillatelser. Modellmotstanden er omregnet til fullskala ved motstandsberegningene gitt i metoddelen.

Figur 32 viser en sammenligning av motstandskurvene i fullskala mellom 21-meteren og 15-meteren ved samme dypgang og hastigheter. Observasjonene indikerer at ved lav hastighet er det liten forskjell mellom modellene. Imidlertid, når hastigheten øker, opplever 21-meteren en markant økning i motstand før den igjen synker og går under 15-meteren. Det kan bemerkes at motstands økningen på 21-meteren er signifikant fra 8 til 10 knop og fra 12 til 13 knop.



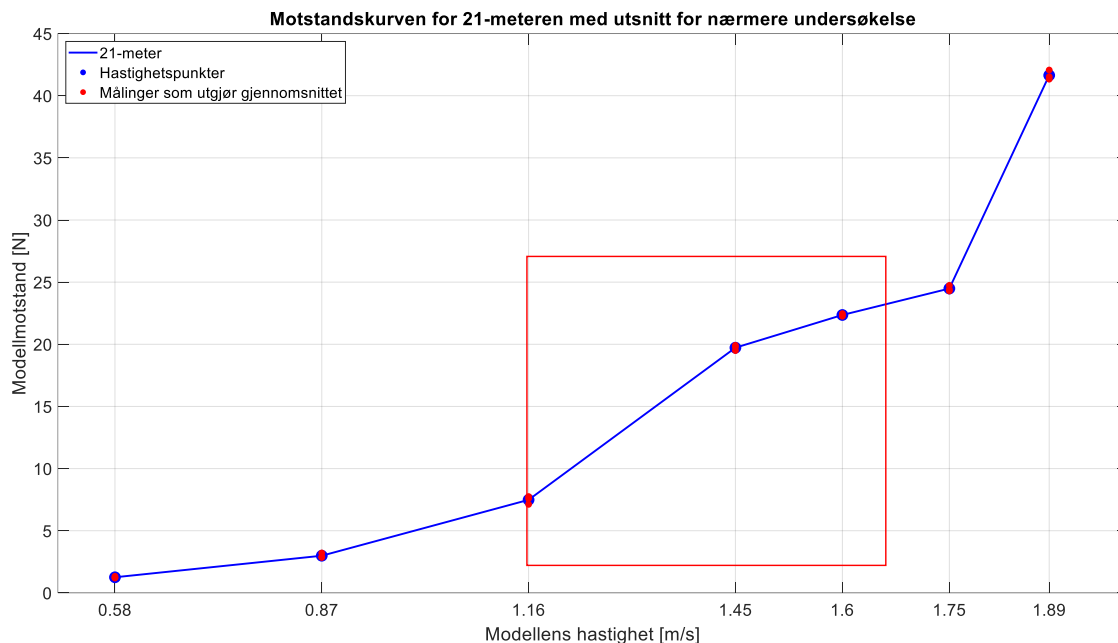
Figur 32 - Fullskala sammenligning mellom 21-meteren og 15-meteren [1].

Tabell 9 sammenligner sleperesultatene mellom de to modellene. Ved lave hastigheter har 21-meteren høyere motstand fra 4 til 10 knop, med unntak av 8 knop hvor 21-meteren har lavere motstand. Når farten øker, opplever 21-meteren en lavere økning i motstand enn 15-meteren. Derimot, fra 12 knop øker motstanden for 21-meteren betraktelig mer enn for 15-meteren.

V_s [Knop]	V_m [m/s]	F_n	21-meteren [kN]	F_n	15-meteren [kN]	Differanse ift 21-meteren [kN]	Differanse [%]
4	0.58	0.14	1.657	0.17	1.512	0.145	10 %
6	0.87	0.21	4.306	0.25	3.980	0.326	8 %
8	1.16	0.28	12.292	0.34	13.833	-1.541	-11 %
10	1.45	0.35	35.620	0.42	27.090	8.529	31 %
11	1.60	0.39	40.196	0.47	46.312	-6.116	-13 %
12	1.75	0.43	43.716	0.51	72.337	-28.621	-40 %
13	1.89	0.46	77.389	0.55	86.440	-9.051	-10 %

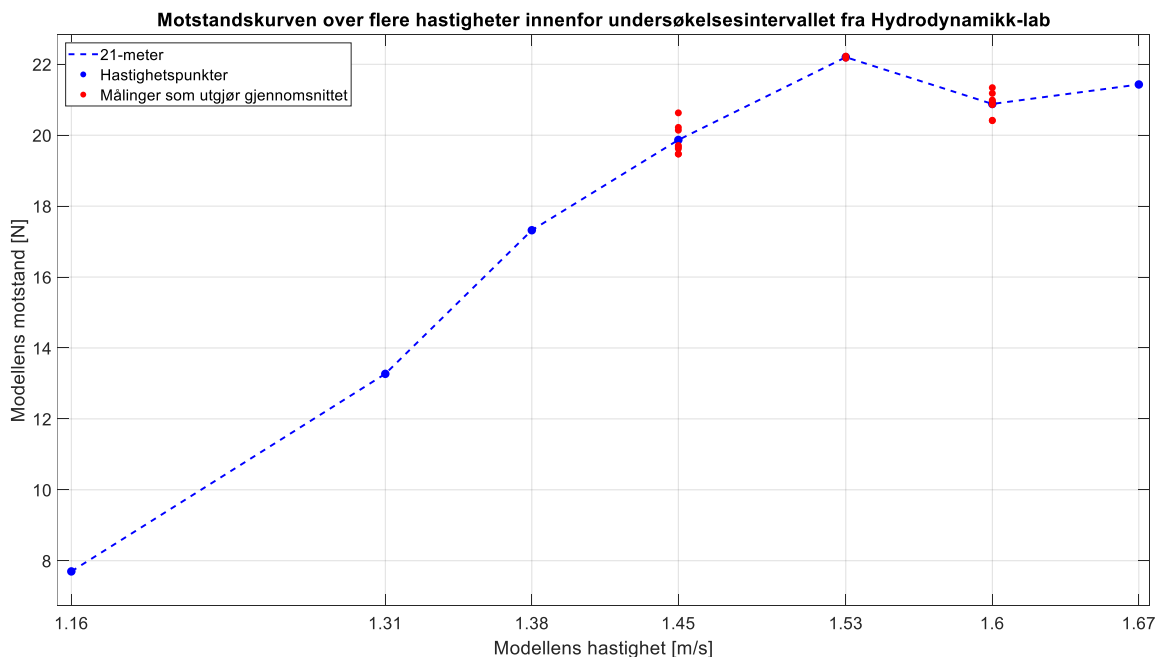
Tabell 9 – Sammenligning av fullskala skipsmotstand mellom 21- og 15-meteren. F_n (Froude tall) [1].

Grunnet den signifikante økningen i motstand ved rundt 1.45 m/s (10 knop i fullskala) ble det sendt en forespørsel til foreleser i Hydrodynamikk om å undersøke hastighetene rundt dette punktet ved neste lab-øvelse i faget. Området av interesse er markert med et utsnitt i Figur 33. Det bemerkes også at motstands økningen etter dette punktet og fram til 1.75 m/s er betydelig lavere for 21-meteren enn for 15-meteren.



Figur 33 - Motstandskurven for 21-meteren med utsnitt for nærmere undersøkelse.

Figur 34 viser resultatene fra gruppene i Hydrodynamikk. Her kommer det tydeligere fram at den merkbare økningen i motstand skjer ved rundt 1.53 m/s. Videre, når hastigheten øker, synker motstanden til den når 1.60 m/s. Deretter begynner motstanden å øke igjen. Det var kun i intervallet mellom 1.45 og 1.60 m/s at gruppene fikk kjørt flere forsøk av samme hastighet, vist ved de røde prikkene i figuren.



Figur 34 – Motstandskurven over flere hastigheter innenfor undersøkelsesintervallet.

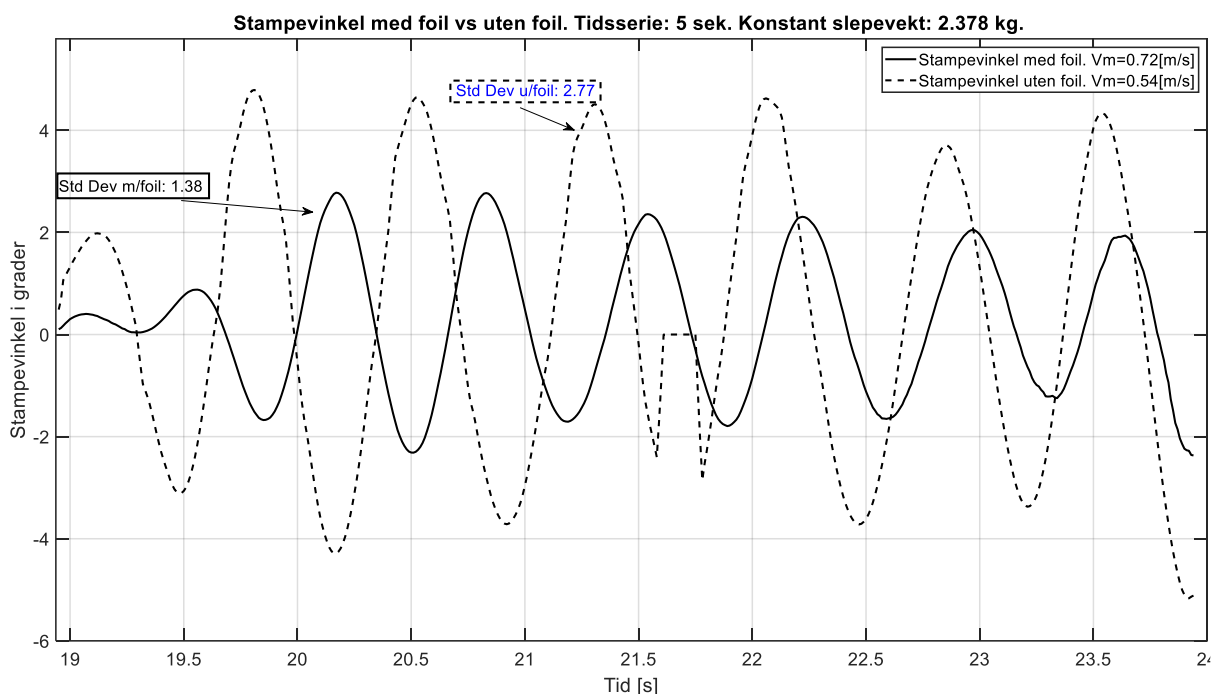
3.2 15-meteren i bølger

I dette kapitlet presenteres resultatene for 15-meteren i bølger. Tabell 10 illustrerer hvordan hastighetene er hentet ut for de to konfigurasjonene med høy slepevekt. Det samme er gjort for konfigurasjonene med lav slepevekt.

	Mean run 1	Mean run 2	Mean run 3	Mean run 4	Gj. snitt
Hastighet m/foil høy slepevekt [m/s]	1.111	1.111	1.102	1.111	1.109
Hastighet u/foil høy slepevekt [m/s]	1.057	1.075	1.048	1.066	1.062

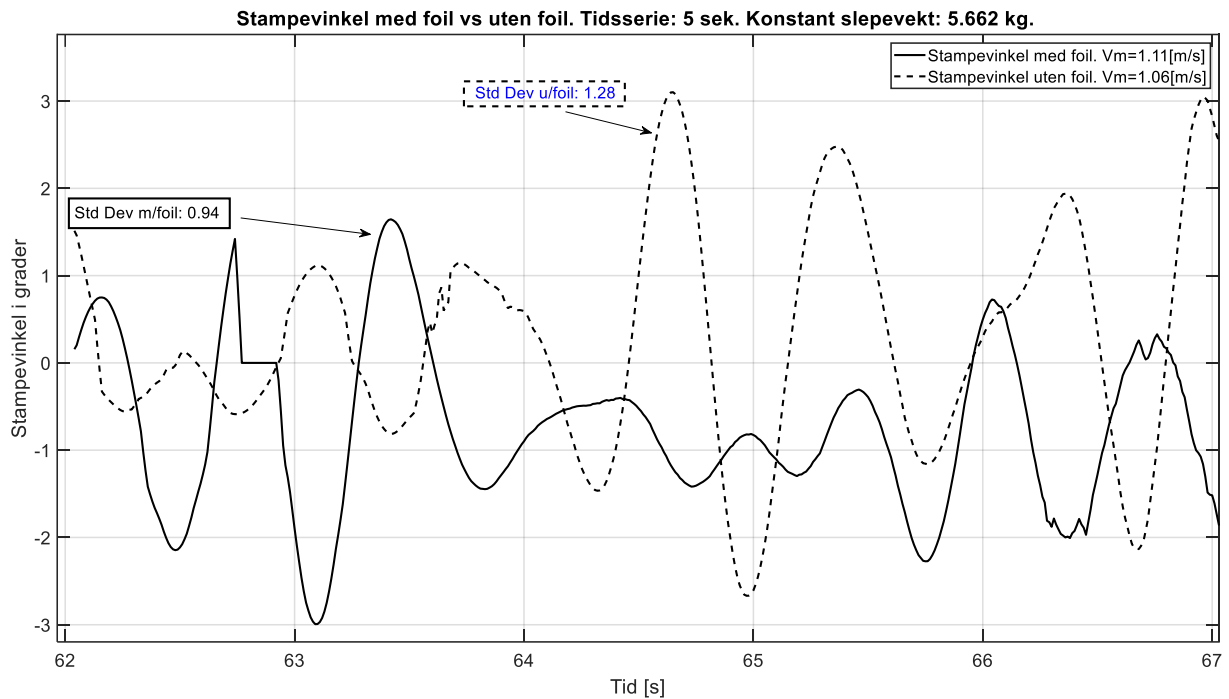
Tabell 10 – Illustrerer hvordan hastighetene er hentet ut. Eksempelet over for høy slepevekt.

Figur 35 viser modellens stampevinkel med og uten baugfoil med en slepevekt på 2.378 kg. Det er en tydelig reduksjon i stampebevegelsene med baugfoil hvor standardavviket er 1.38 mot 2.77 uten baugfoil. Det kommer frem i disse resultatene at det er en gjentakende reduksjon over flere perioder som er kjørt. Det bemerkes også at hastigheten er 0.18 m/s høyere med baugfoil.



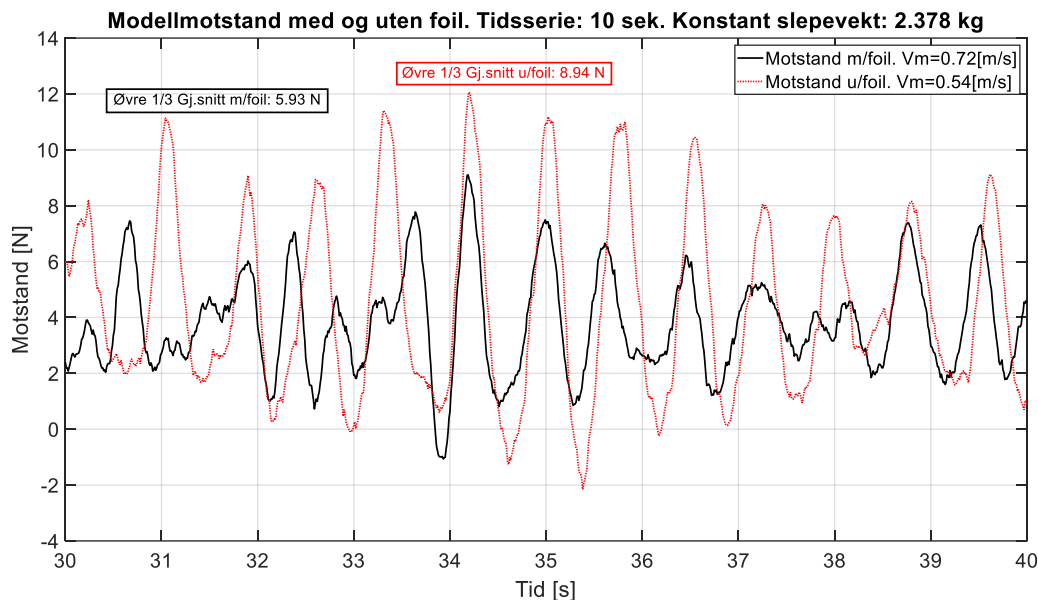
Figur 35 – Viser stampevinkel med og uten baugfoil.

Figur 36 viser modellens stampevinkel med og uten baugfoil med en slepevekt på 5.662 kg. Her er det ikke like tydelig at foilen har den samme effekt som i den lavere hastigheten. Det bemerkes likevel at standardavviket med baugfoil er 0.94 og uten er 1.28 som fortsatt er en reduksjon i stampebevegelser. Hastighetsøkningen er ikke like markant, men med baugfoil oppnås det fortsatt en liten økning på 0.05 m/s.



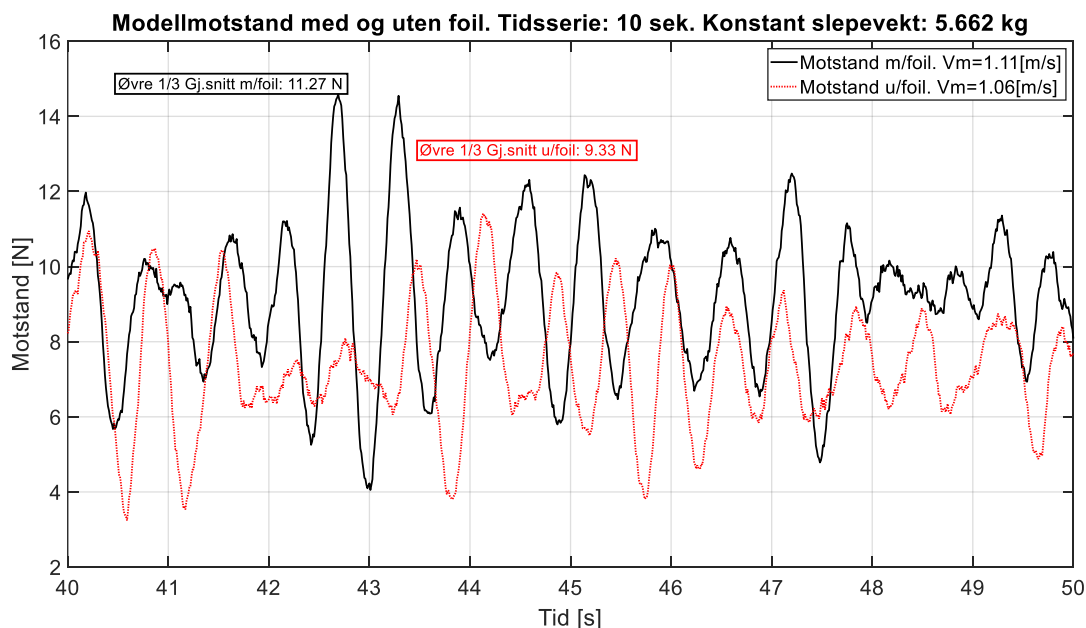
Figur 36 - stampebevegelsen med og uten baugfoil.

Figur 37 viser hvordan motstanden endrer seg over en 10 sekunders tidsserie med en slepevekt på 2.378 kg. Observasjonene over flere perioder viser at bruk av baugfoil resulterer i lavere motstand og høyere hastighet. Ved å bruke MATLAB til å regne ut gjennomsnittet av de 1/3 høyeste motstandstoppene, observeres det i underkant av 3 N mindre motstand med baugfoil. Hastigheten har samtidig økt fra 0.54 til 0.72 m/s. Det er benyttet konstant propulsjonskraft i forsøkene som betyr at en økning i hastighet kommer fra en reduksjon i motstand.



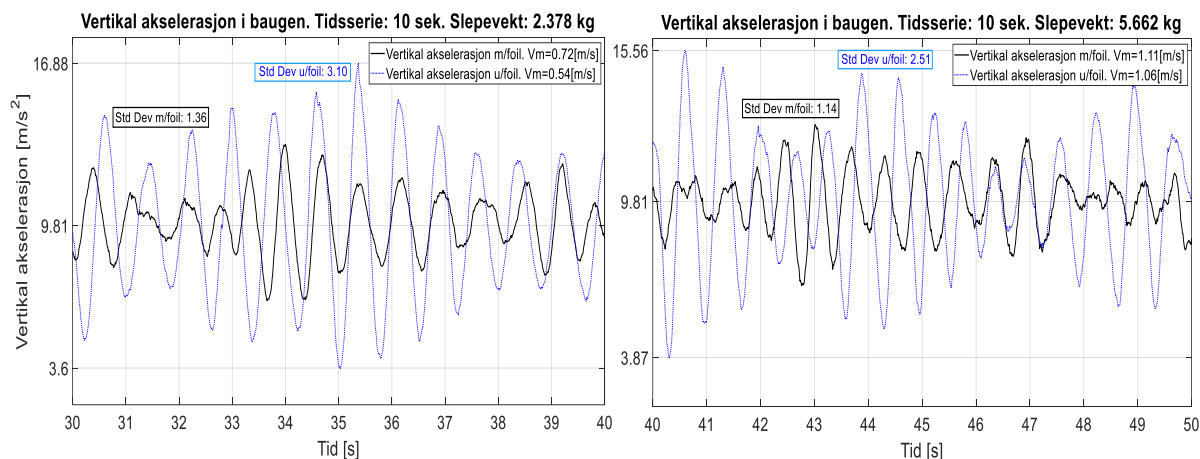
Figur 37 - Motstand med og uten baugfoil med lav slepevekt.

Figur 38 viser hvordan motstanden endrer seg over en 10 sekunders tidsserie med en slepevekt på 5.662 kg. Her bemerkes det, fra gjennomsnittsverdiene av de 1/3 høyeste toppene, at motstanden er i underkant av 2 N høyere med baugfoil. Dette gjenspeiles derimot ikke i hastigheten, som også har økt. Økningen i hastighet er likevel liten, 0.05 m/s, men til stede.



Figur 38 - Motstand med og uten baugfoil med høy slepevekt.

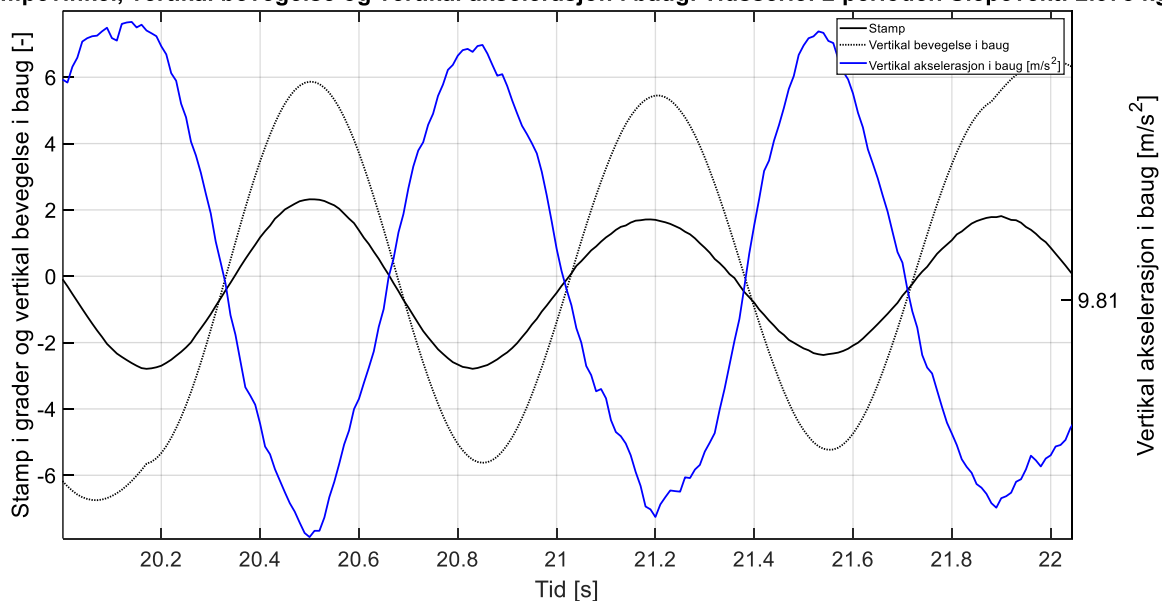
Figur 39 a) viser resultatene for modellens akselerasjon i baugen med en slepevekt på 2.378 kg. Her kommer det tydelig fram at akselerasjonene i baugen er mindre med baugfoil enn uten. Dette bekreftes ved å se på standardavvikene som er 1.36 med baugfoil og 3.10 uten. Videre i Figur 39 b), med en slepevekt på 5.662 kg, observeres det også mindre vertikal akselerasjon i baugen med baugfoil enn uten. Her er standardavvikene 1.14 med baugfoil og 2.51 uten. Ved å sammenligne de to figurene observeres det at ved lavere slepehastigheter er de vertikale akselerasjonene i baugen høyere.



Figur 39 a) og b) – Viser sammenligning av tyngdeakselerasjon med og uten baugfoil.

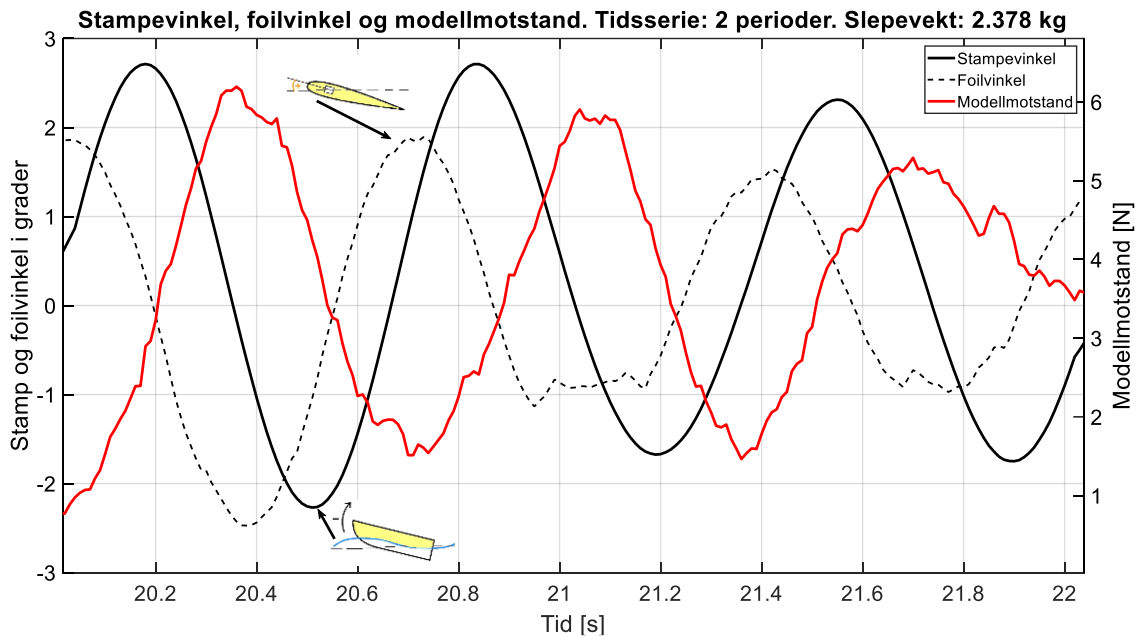
Figur 40 illustrerer at den vertikale bevegelsen i baugen er i direkte motfase med den vertikale akselerasjonen i baugen. Stampevinkelen er multiplisert med (-1) i figuren under for å gjøre det tydeligere at bevegelsen i baugen er i samme fase som stampevinkelen. Det er verdt å nevne videre at foilvinkel og motstand er hentet fra måleutstyret på modellen mens stampevinkel er hentet fra Qualisys kameraene. Motfasen i Figur 40 legger dermed grunnlaget for at sammenligningen mellom stampevinkel, foilvinkel og motstand blir korrekt, i og med at de to uavhengige målingene ikke alltid ble startet likt.

Stampevinkel, vertikal bevegelse og vertikal akselerasjon i baug. Tidsserie: 2 perioder. Slepevekt: 2.378 kg



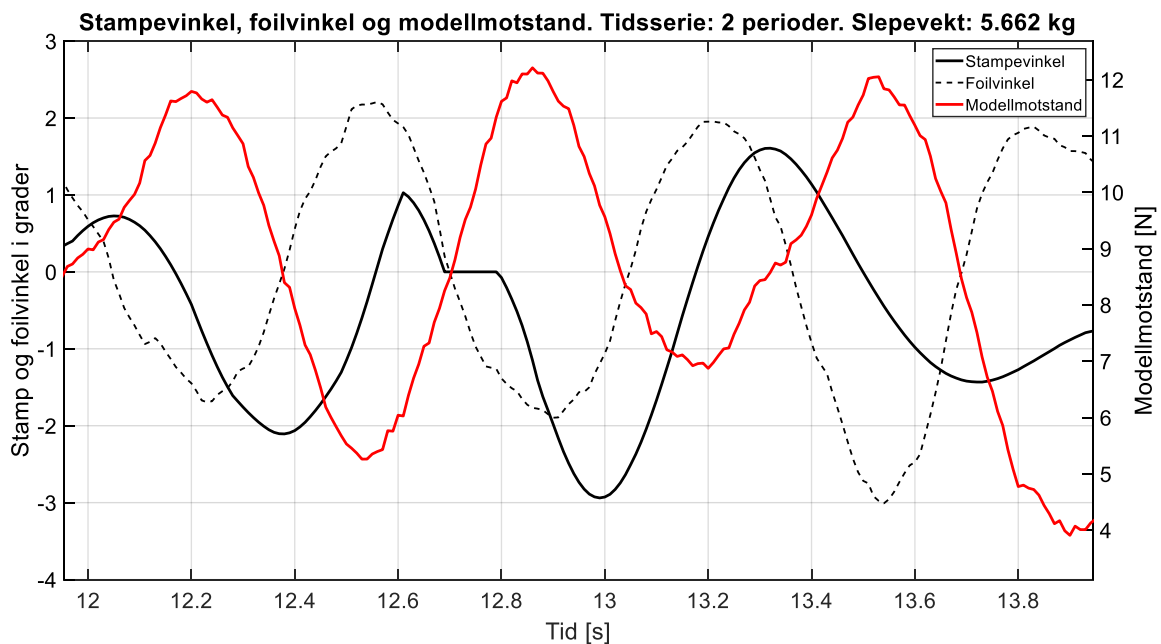
Figur 40 – Illustrerer at vertikal akselerasjon er i direkte motfase med bevegelsen i baugen.

Figur 41 viser resultater for stampevinkel, foilvinkel og motstand med en slepevekt på 2.378 kg. Her er det viktig å bemerke seg at negativ stampevinkel tilsier at båten peker oppover og at positiv foilvinkel tilsier at foilen peker oppover. Det observeres først og fremst at motstanden er høyest når modellen har nådd bunnen av en bølge og baugen krysser 0 grader i retning oppover igjen. Videre kan det bemerkes at foilen også når sin mest negative vinkel i dette punktet. Det er derfor tydelig at foilen jobber imot stampebevegelsene til båten. Motstanden ser ut til å være i 90 graders faseforskyvning fra stampevinkelen. Foilvinkelen er i direkte motfase, 180 grader faseforskyvning, i forhold til motstanden. I forhold til stampevinkelen, er foilvinkelen omtrent 270 graders faseforskyvet.



Figur 41 - Viser stampevinkel, foilvinkel og modellmotstand. Merk positiv stampe og foilvinkel.

Figur 42 viser stampevinkel, foilvinkel og motstand med 5.662 kg slepevekt. Her bemerkes det at stampevinkelutslagene er lavere sammenlignet med den lavere slepevekten.



Figur 42 – Viser Stampevinkel, foilvinkel og modellmotstand.

4. Diskusjon

På grunn av begrenset tid var det ikke mulig å undersøke de uforventede motstandsresultatene med 21-meteren nærmere. Det ville vært interessant å finne ut om dette skyldes modellens lengde-breddeforhold, eller om det er andre faktorer som bidrar til den signifikante økningen og reduksjonen i motstand. Det er viktig å nevne at modellene er kjørt med samme hastighet og ikke samme Froude tall, grunnet lengdeforskjellen.

For å teste baugfoilens evne til å dempe stampebevegelsene, burde regulære sinusbølger vært benyttet. De irregulære bølgene gjør det utfordrende å sammenligne resultatene når det aldri kan sies med sikkerhet at samme bølger treffer båten ved forskjellige kjøring. Irregulære bølgekjøringer ville passet bedre i en lengre tank med fullstendig synkronisert målestyr for bedre kartlegging av effekten til baugfoilen i en slik kondisjon. Ved bruk av regulære sinusbølger ville sammenligningen blitt enklere, da det ville vært den samme bølgen som traff båten hver gang. Det ville gitt et mer konkret resultat på effekten av baugfoilen ved ulik slepevekt.

Bølgekjøringene med lav slepevekt viser at når motstanden minker så øker hastigheten. Derimot, med høyere slepevekt, øker både motstanden og hastigheten. Dette kan være et resultat av at modellen opplever forskjellige bølger på forskjellige tidspunkt.

5. Konklusjon

Slepeforsøk i stille vann med 21-meteren resulterte i høyere motstand enn 15-meteren ved lavere hastigheter fra 4 til 6 knop. Rundt 8 knop hadde imidlertid 21-meteren lavere motstand. Da hastigheten økte til 10 knop, steg motstanden på 21-meteren betydelig. Ved hastigheter over 10 knop hadde 21-meteren igjen lavere motstand enn 15-meteren. De største forskjellene i oppstår ved 10 og 12 knop. Ved førstnevnte har 21-meteren 31% høyere motstand, mens ved 12 knop har 21-meteren 40% mindre motstand.

Slepeforsøkene i bølger med 15-meteren viste en tydelig reduksjon i motstand og stampebevegelser med aktiv baugfoil ved den lave slepevekten. Hastigheten økte med 33% med baugfoil og stampebevegelsene reduserte fra et standardavvik på 2.77 uten baugfoil, til 1.38 med baugfoil. Ved den høye slepevekten var derimot effekten mindre. Hastigheten økte med 5% med baugfoil, og stampebevegelsene reduserte fra et standardavvik på 1.28 uten baugfoil, til 0.94 med. Resultatene fra den høye slepevekten er mindre pålitelige da både motstand og hastighet økte i et system med konstant slepevekt.

For prosjektets videreføring kunne begge problemstillingene vært undersøkt nærmere. Det anbefales, med tanke på omfanget, å fokusere på én av problemstillingene om gangen. For stille vannskjøringene med 21-meteren anbefales det flere kjøring over flere hastigheter. For videre undersøkelser av aktive baugfoiler anbefales det å benytte regulære sinusbølger. Dette gjør at båtens posisjon i tanken ikke er like avgjørende, da bølgene er konsistente. Dataene blir også lettere å sammenligne, og effekten til baugfoilen kommer tydeligere frem. Det kan også være interessant å prøve andre utforminger og lengder på foilene, samt modifisere plasseringen til gyro/servo slik at foilbevegelsene blir større.

6. Referanse

- [1] V. C.E. Daviknes og K. Nybø Tangenes, «Slepetest på fiskekatamaran med stampefinner (konfidensiell)». høyskolen på vestlandet Bergen, april 2023.
- [2] «Wavefoil - Retractable bow foils», Wavefoil. Åpnet: 9. mai 2024. [Online]. Tilgjengelig på: <https://wavefoil.com/>
- [3] Wavefoil, «Full-Scale Test of WH1050 (M/S Thea Jensen)», Ålesund, 2020. [Online]. Tilgjengelig på: <https://wavefoil.com/wp-content/uploads/2022/05/Full-Scale-Test-of-WF1050.pdf>
- [4] «Maritime Engineering», Maritime Engineering. Åpnet: 9. mai 2024. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.meng.no/nb.html>
- [5] A. H. Røen (OLD-fiskeribladet-87), «Mundal Båt er komposittspesialister», Fiskeribladet | Nyheter om fiskeri og havbruk. Åpnet: 15. april 2024. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.fiskeribladet.no/nyheter/mundal-bat-er-komposittspesialister/8-1-38610>
- [6] «Båt», Mundal. Åpnet: 15. april 2024. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.mundal.no/baat>
- [7] S. S. Lysvold, «Flere og flere klumpebåter – Fiskerne føler seg ikke hørt», NRK. Åpnet: 15. april 2024. [Online]. Tilgjengelig på: https://www.nrk.no/nordland/paragrafbater_-fiskere_-forskere-og-skipsdesigner-vil-slanke-fiskebatene-1.15884995
- [8] A. Osnes, «deplasement», *Store norske leksikon*. 22. august 2023. Åpnet: 9. mai 2024. [Online]. Tilgjengelig på: <https://snl.no/deplasement>
- [9] K. Tabri, J. Määttänen, og J. Ranta, «Model-scale experiments of symmetric ship collisions», *J. Mar. Sci. Technol.*, bd. 13, nr. 1, s. 71–84, feb. 2008, doi: 10.1007/s00773-007-0251-z.
- [10] «28.1.2 Kinematic Similarity - Knovel». Åpnet: 9. mai 2024. [Online]. Tilgjengelig på: https://app.knovel.com/web/view/khtml/show.v/rcid:kpFSHFMSRK/cid:kt0125DR04/viewerType:khtml/root_slug:fundamentals-ship-hydrodynamics/url_slug:laws-of-similitude?&b-toc-cid=kpFSHFMSRK&b-toc-title=Fundamentals%20of%20Ship%20Hydrodynamics%20-%20Fluid%20Mechanics%2C%20Ship%20Resistance%20and%20Propulsion&b-toc-url-slug=ship-resistance&view=collapsed&zoom=1&page=2
- [11] «Similarity», *kompedium*. MIT OpenCourseWare, 2013. [Online]. Tilgjengelig på: https://ocw.mit.edu/courses/2-25-advanced-fluid-mechanics-fall-2013/506579a6771b7004e583ea8b28423b7c_MIT2_25F13_Similarity.pdf
- [12] «28.1.3 Dynamic Similarity - Knovel». Åpnet: 9. mai 2024. [Online]. Tilgjengelig på: https://app.knovel.com/web/view/khtml/show.v/rcid:kpFSHFMSRK/cid:kt0125DR31/viewerType:khtml/root_slug:fundamentals-ship-hydrodynamics/url_slug:dynamic-similarity?&b-toc-cid=kpFSHFMSRK&b-toc-title=Fundamentals%20of%20Ship%20Hydrodynamics%20-%20Fluid%20Mechanics%2C%20Ship%20Resistance%20and%20Propulsion&b-toc-url-slug=ship-resistance&view=collapsed&zoom=1&page=4
- [13] «Fresh Water and Seawater Properties», 2011, [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.ittc.info/media/7989/75-02-01-03.pdf>
- [14] A. F. Molland, D. A. Hudson, og S. R. Turnock, Red., «Components of Hull Resistance», i *Ship Resistance and Propulsion: Practical Estimation of Ship Propulsive Power*, 2. utg., Cambridge: Cambridge University Press, 2017, s. 12–69. doi: 10.1017/9781316494196.005.
- [15] «Motstand på skip», *kompedium*. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet. Åpnet: 24. april 2024. [Online]. Tilgjengelig på: <http://www.marin.ntnu.no/havromsteknologi/depot/temahefter/motstand.pdf>
- [16] «No Slip Condition - an overview | ScienceDirect Topics». Åpnet: 22. april 2024. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/no-slip-condition>
- [17] J. G. Leishman, «Boundary Layers», jan. 2023, doi: 10.15394/eaglepub.2022.1066.n22.
- [18] S. Steen, «MOTSTAND OG PROPULSJONPROPELL-OG FOILTEORI», *kompedium*. Akademika forlag, Trondheim, januar 2007.
- [19] «Resistance Test». 2011. Åpnet: 9. april 2024. [Online]. Tilgjengelig på: <https://itc.info/media/1217/75-02-01.pdf>
- [20] «Guideline on the determination of model-ship correlation factors». 2017. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.ittc.info/media/8185/75-04-05-01.pdf>

- [21] H. Walderhaug, «Motstand, Framdrift, Styring», *kompedium*.
- [22] «14.5 Lift and Drag of Airfoils - Knovel». Åpnet: 9. mai 2024. [Online]. Tilgjengelig på: https://app.knovel.com/web/view/khtml/show.v/rcid:kpIFM00029/cid:kt00U5EED2/viewerType:khtml/root_slug:introduction-fluid-mechanics/url_slug:external-f-lift-drag-airfoils?&b-toc-cid=kpIFM00029&b-toc-root-slug=introduction-fluid-mechanics&b-toc-title=Introduction%20to%20Fluid%20Mechanics%20%28OUP%20Edition%29&b-toc-url-slug=fundamental-concepts&kpromoter=federation&view=collapsed&zoom=1&page=47
- [23] «3.3.6 Lift and Drag on Airfoils - Knovel». Åpnet: 9. mai 2024. [Online]. Tilgjengelig på: https://app.knovel.com/web/view/khtml/show.v/rcid:kpIFM00029/cid:kt00U5E8Z9/viewerType:khtml/root_slug:introduction-fluid-mechanics/url_slug:lift-drag-airfoils?&b-toc-cid=kpIFM00029&b-toc-root-slug=introduction-fluid-mechanics&b-toc-title=Introduction%20to%20Fluid%20Mechanics%20%28OUP%20Edition%29&b-toc-url-slug=fundamental-concepts&kpromoter=federation&view=collapsed&zoom=1&page=36
- [24] «Resources | Aerodynamics for Students». Åpnet: 14. mai 2024. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.aerodynamics4students.com/aircraft-performance/lift-and-lift-coefficient.php>
- [25] J.-H. Jorde, «Rullereduksjon for fartøyer», *kompedium*.
- [26] «What Is Reynolds Number and Why Is It Important?». Åpnet: 22. mars 2024. [Online]. Tilgjengelig på: <https://resources.system-analysis.cadence.com/blog/msa2022-what-is-reynolds-number-and-why-is-it-important>
- [27] J. G. Leishman, «Aerodynamics of Airfoil Sections», jan. 2023, doi: 10.15394/eaglepub.2022.1066.n23.
- [28] «NACA 0021 (naca0021-il)». Åpnet: 14. mai 2024. [Online]. Tilgjengelig på: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca0021-il#polars>
- [29] «NACA 0021 (naca0021-il)». Åpnet: 9. mai 2024. [Online]. Tilgjengelig på: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca0021-il>
- [30] «1.6 Irregular Waves - Knovel». Åpnet: 9. mai 2024. [Online]. Tilgjengelig på: https://app.knovel.com/web/view/khtml/show.v/rcid:kpMERBAGS2/cid:kt006JV9D6/viewerType:khtml/root_slug:maritime-engineering/url_slug:regular-waves?&b-toc-cid=kpMERBAGS2&b-toc-root-slug=maritime-engineering&b-toc-title=Maritime%20Engineering%20Reference%20Book%20-%20A%20Guide%20to%20Ship%20Design%2C%20Construction%20and%20Operation&b-toc-url-slug=marine-environment&kpromoter=federation&view=collapsed&zoom=1&page=9
- [31] «Linearized (Airy) Wave Theory». Åpnet: 29. april 2024. [Online]. Tilgjengelig på: https://web.mit.edu/fluids-modules/www/potential_flows/LecturesHTML/lec19bu/node3.html
- [32] H. Ormestad og K. Hofstad, «egenfrekvens», *Store norske leksikon*. 22. august 2023. Åpnet: 30. april 2024. [Online]. Tilgjengelig på: <https://snl.no/egenfrekvens>
- [33] «faseforskyvning», *Store norske leksikon*. 22. august 2023. Åpnet: 14. mai 2024. [Online]. Tilgjengelig på: <https://snl.no/faseforskyvning>
- [34] «Graphical representation of Simple Harmonic Motion», BYJUS. Åpnet: 19. mai 2024. [Online]. Tilgjengelig på: <https://byjus.com/jee/graphical-representation-of-simple-harmonic-motion/>
- [35] «Relationship Among Displacement, Velocity, Frequency, and Acceleration During Sinusoidal Motion». Åpnet: 19. mai 2024. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.spaceagecontrol.com/calcsinm.htm>
- [36] «MarinLab». Åpnet: 9. mai 2024. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.hvl.no/om/marinlab/>
- [37] «Welcome to MarinLab». høyskolen på vestlandet Bergen. Åpnet: 2. mars 2024. [Online]. Tilgjengelig på: https://home.hvl.no/ansatte/gste/ftp/MarinLab_files/Retningslinjer/Retningslinjer_LAB_leaflet_oppdatert2021november.pdf
- [38] G. Wu, L. Han, og L. Zhang, «Numerical Simulation and Backscattering Characteristics of Freak Waves Based on JONSWAP Spectrum», *Front. Mar. Sci.*, bd. 9, mai 2022, doi: 10.3389/fmars.2022.868737.
- [39] «Modellfly | RC Fly | Radiostyrte fly», modellflyger. Åpnet: 9. mai 2024. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.modellflyger.no>

- [40] «The gain in Power, Current, and Voltage», Unacademy. Åpnet: 24. april 2024. [Online]. Tilgjengelig på: <https://unacademy.com/content/upsc/study-material/physics/the-gain-in-power-current-and-voltage/>
- [41] «5+, 6+ and 7+ series», Qualisys. Åpnet: 9. mai 2024. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.qualisys.com/cameras/5-6-7/>
- [42] «INS benefits over MRU in Hydrography». Åpnet: 9. mai 2024. [Online]. Tilgjengelig på: <https://support.sbg-systems.com/sc/kb/latest/technology-insights/ins-benefits-over-mru-in-hydrography>

Liste over Figurer

Figur 1 - 15-meteren i MarinLab med utstyr montert for bølgekjøringer.	2
Figur 2 – 21-meteren i MarinLab klar for stille vannskjøringer.....	3
Figur 3 – Viser fordelingen av motstands komponentene [15].	5
Figur 4 - Illustrasjon av hastighetsprofil på en overflate [17].	6
Figur 5 – Illustrerer hvordan motstandskoeffisientene varierer med Froudes-tall [15].....	6
Figur 6 - Viser R_e opp mot motstandskoeffisientene [18].	7
Figur 7 - Korrelasjons koeffisienten hentes ut med punktet som er markert i rødt [21]	8
Figur 8 - Viser noen av parameterne på en foil [23]	9
Figur 9 - (a) laminær strømning og (b) turbulent strømning (c) c_l mot angrepsvinkel for NACA0021 [28]	10
Figur 10 - Økende angrepsvinkel gir tidligere separasjons punkt på foil [17].	11
Figur 11 - Bølge parametere [31].	12
Figur 12 - Faseforskyvning av posisjon, hastighet og akselerasjon [35].....	12
Figur 13 – MarinLab [37].....	13
Figur 14 – STEP-fil av 21-meteren i Creo Parametric. Her kan man se at både dekket og baugprofilene kan demonteres fra skrogparene.	13
Figur 15 – Den aktive baugfoilkonfigurasjonen modellert i CAD.	14
Figur 16 – 3D-print av den første baugprofilen. Verdt å nevne at baugprofilene ble produsert stående i tiden etter.	14
Figur 17 – Wifi-modul og batteri på 21-meteren for stille vannskjøringer.	15
Figur 18 – 21-meteren sett forfra med tradisjonelle bauger.	15
Figur 19 – JONSWAP bølgespekter ved ulike gamma-verdier [38].	16

Figur 20 – Illustrasjon av oppsettet med gyro, servo og baugfoil [4].	17
Figur 21 – Oppsettet med gyro, servo og batteri [4].	17
Figur 22 – Oversikt over alt utstyr som trengs for bølgekjøringer med 15-meteren.....	18
Figur 23 – 15-meteren sett forfra med aktiv baugfoil konfigurasjon.	18
Figur 24 a) og b) – De seks frihetsgradene [42] og ett av Qualisys kameraene [41].	19
Figur 25 – Kalibrering av lastcelle	20
Figur 26 – Lastcelle montert	20
Figur 27 – Testoppsett for stille vannskjøringer med 21-meteren.....	20
Figur 28 – Testoppsett for bølgekjøringer med 15-meteren sett fra siden.	21
Figur 29 – Viser hvordan gjennomsnittsmotstand er hentet ut fra kjøringene.	22
Figur 30 - Ufiltrert data fra en typisk bølgekjøring med 15-meteren.....	23
Figur 31 – Viser måledata med stampevinkel fra Qualisys kameraene under en typisk bølgekjøring..	23
Figur 32 - Fullskala sammenligning mellom 21-meteren og 15-meteren [1].....	25
Figur 33 - Motstandskurven for 21-meteren med utsnitt for nærmere undersøkelse.	26
Figur 34 – Motstandskurven over flere hastigheter innenfor undersøkelsesintervallet.....	26
Figur 35 – Viser stampevinkel med og uten baugfoil.	27
Figur 36 - stampebevegelsen med og uten baugfoil.....	28
Figur 37 - Motstand med og uten baugfoil med lav slepevekt.	29
Figur 38 - Motstand med og uten baugfoil med høy slepevekt.	29
Figur 39 a) og b) – Viser sammenligning av tyngdeakselerasjon med og uten baugfoil.	30
Figur 40 – Illustrerer at vertikal akselerasjon er i direkte motfase med bevegelsen i baugen.....	30
Figur 41 - Viser stampevinkel, foilvinkel og modellmotstand. Merk positiv stamp og foilvinkel.	31
Figur 42 – Viser Stampevinkel, foilvinkel og modellmotstand.	31
Figur 43 – Bølgekjøring med 15-meteren	38
Figur 44 – Bølgekjøring med 15-meteren.	39

Liste over Tabeller

Tabell 1: Hoveddimensjoner 15-meter fullskala fartøy i "utrustet kondisjon"[1].....	2
Tabell 2 - Hoveddimensjoner 21-meter fullskala fartøy i "utrustet kondisjon".	3
Tabell 3 – Hoveddimensjoner for baugfoilen mellom skrogene på 15-meteren.	14
Tabell 4 – Ballastering og vekt av utstyr på 21-meteren.	16
Tabell 5 - Ballastering og vekt av utstyr på 15-meteren.	19
Tabell 6 – Testmatrise for stille vannskjøringene med 21-meteren. Det tok to hele dager i MarinLab å gjennomføre alle kjøringene.	22
Tabell 7 – Parametere for bølgekjøringene.	23
Tabell 8 – Nøyaktigheten til måleutstyr og printer	24
Tabell 9 – Sammenligning av fullskala skipsmotstand mellom 21 og 15-meteren. Fn (Froude tall) [1].	Feil! Bokmerke er ikke definert.
Tabell 10 – Illustrerer hvordan hastighetene er hentet ut. Eksempelet over for høy slepevekt.....	27
Tabell 11 – Viser hvordan gjennomsnittet for motstanden på 21-meteren er kalkulert.	37

Vedlegg – tabell og bilder

Tabell 11 viser målingene fra hver kjøring for 21-meteren.

	Skipshastighet V_s [Knop]	Modellhastighet V_m [m/s]	Run 1 [N]	Run 2 [N]	Run 3 [N]	Gj. snitt [N]
V_{m1}	4	0.58	1.197	1.239	1.332	1.256
V_{m2}	6	0.87	2.849	3.211	2.905	2.989
V_{m3}	8	1.16	7.585	7.124	7.749	7.486
V_{m4}	10	1.45	19.495	19.916	19.768	19.726
V_{m5}	11	1.60	22.257	22.349	22.468	22.358
V_{m6}	12	1.75	24.741	24.428	24.289	24.486
V_{m7}	13	1.89	41.527	41.330	42.066	41.641

Tabell 11 – Viser hvordan gjennomsnittet for motstanden på 21-meteren er kalkulert.



Figur 43 – Bølgekjøring med 15-meteren



Figur 44 – Bølgekjøring med 15-meteren.

