

# Optimale hydrofoil-konfigurasjoner på arbeidsbåter i HAVtruck-klassen

Eirik Gussiås  
Dani Andersen  
Anders Franzen

Bacheloroppgave i Marinteknikk  
Bergen, Norge 2019





# Optimale hydrofoil-konfigurasjoner på arbeidsbåter i HAVtruck-klassen

Eirik Gussiås  
Dani Andersen  
Anders Franzen

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 Lümmen

*English title:* Optimal hydrofoil configurations on boats in the HAVtruck class

Forfatter(e), studentnummer: Eirik Gussiås, h181317  
Dani Andersen, h181294  
Anders Franzen, h181293

Studieprogram: Marinteknikk  
Dato: Mai 2019  
Rapportnummer: IMM 2019-M40  
Veileder ved HVL: Gloria Stenfelt HVL ansatt  
Oppdragsgiver: Marine Engineering AS  
Oppdragsgivers referanse: Helge Folgerø-Holm

Antall filer levert digitalt: 2

## Forord

Denne bacheloroppgaven er skrevet ved Institutt for Maskin- og Marinfag (IMM) ved Høgskulen på Vestlandet (HVL), studieprogram Marinteknikk. Hovedtema for denne oppgaven er hydrofoilteori. Interne veiledere er lektor ved institutt for maskin- og marinteknikk, Gloria Stenfelt, og Jan Bartl. Dette prosjektet er skrevet i samarbeid med Maritime Engineering AS. Ekstern veileder ved Maritime Engineering er maskiningeniør Helge Folgerø-Holm.

### Takk til

Vi ønsker å takke personer som har hjulpet oss gjennom dette prosjektet:

**Jan Bartl**, intern veileder, for god veiledning og oppfølging gjennom hele oppgaven

**Dr. Gloria Stenfelt**, intern veileder, for god veiledning og oppfølging gjennom hele oppgaven

**Helge Folgerø-Holm**, ekstern veileder, for veiledning

**Bernt Hustad Hembre**, avdelingsingeniør, for god hjelp i MarinLab

**Harald Moen**, overingeniør, for hjelp med modellbygging

**Nafez Ardestani**, avdelingsingeniør, for hjelp med fresing av modell





## Sammendrag

Denne rapporten er basert på et samarbeid mellom HVL campus Bergen og Maritime Engineering AS, hvor det blir forsket på bruken av hydrofoiler på en Lerøy-arbeidsbåt i HAVtruck klassen. Det vil bli tatt for seg teoretiske metoder for å designe skalerte hydrofoiler til en modell av arbeidsbåten, som blir brukt til å utføre slepeeksperimenter i en bølgetank. Eksperimentene vil vise hvor signifikant motstanden og hastigheten til modellen endrer seg gjennom overgangen fra å være i vannlinjen til å løftes opp. Dette gjøres for å avgjøre om hvor mye mer effektiv arbeidsbåten kan bli.

Hvorfor foiler skaper løft og hvordan dette reduserer båtens totalmotstand vil bli gjennomgått. Målinger og teoretiske beregninger vil sammenlignes og eventuelle forskjeller blir diskutert for å avgjøre hvilke faktorer som kan ha en innvirkning på resultatene.

Forskjellige konfigurasjoner av parametere med hydrofoil arbeidsbåt blir undersøkt. Det har blitt konkludert med resultater som svarer til en reduksjon i totalmotstand på 40% etter fullstendig løft av skrog, og en hastighetsøkning på 31,5% under samme test. Resultatene har vist seg å være konsistente og repeterbare.





## Abstract

This report is based on a cooperation between HVL Campus Bergen and Maritime Engineering AS, where a hydrofoil solution to a Lerøy-work boat, HAVtruck class, is being researched and analysed. There will be a theoretical approach to scaling and designing said hydrofoils for a model of the boat which will be tested in Marinlab, a towing tank test facility situated on the Bergen campus. These experiments will show significant the resistance and velocity of the model change throughout the process of being fully submerged, to the hull being lifted completely above water.

Why the foils create lift and how this reduces the boat's total resistance will be reviewed. Measurements and calculations will be compared, and potential differences will be discussed to determine which factors may impact the results.

Different configurations of parameters of the hydrofoils will be tested for stability. Post-tests, it has been concluded with results that correspond to a reduction in total resistance of 40%, after complete lift of the hull, and an increase in velocity of 31.5% within the same test. The results have been consistent and repeatable.



## Innhold

Forord.....	3
Sammendrag.....	5
Abstract.....	7
1. Innledning.....	11
2. Teori.....	13
2.1 Geometri av foil.....	13
2.2 Hydrofoilteori.....	14
2.3 Grensesjikt teori.....	15
2.3.1 Grensesjikt og strømning.....	15
2.3.2 Steiling.....	16
2.4 Motstand.....	17
2.5 Teoretisk metode.....	18
2.5.1 Utvalg av foil.....	18
2.5.2 Design av foiler.....	20
2.6 Eksperimentell metode.....	23
2.6.1 Skalering til modellskala.....	23
2.6.2 Modell.....	24
2.6.3 Fremgangsmåte.....	25
2.7 Feilkilder.....	26
2.7.1 Modell.....	26
2.7.2 Hydrofoiler design.....	26
2.7.3 Angrepsvinkel.....	26
2.7.4 Slepeteknikk.....	26
3. Resultat.....	27
3.1 Stabilitet og symmetri.....	27
3.2 Motstandskurve.....	28
3.3 Uten foil.....	30
3.4 Overflateeffekt.....	32
3.5 Sensitivitet i parameterendringer.....	33

4. Diskusjon.....	34
4.1 Resultatpåvirkning og endringspotensiale .....	34
4.2 Prinsipiell løsning ved kollisjon.....	34
5. Konklusjon .....	36
Referanser .....	37
Vedlegg.....	39

## 1. Innledning

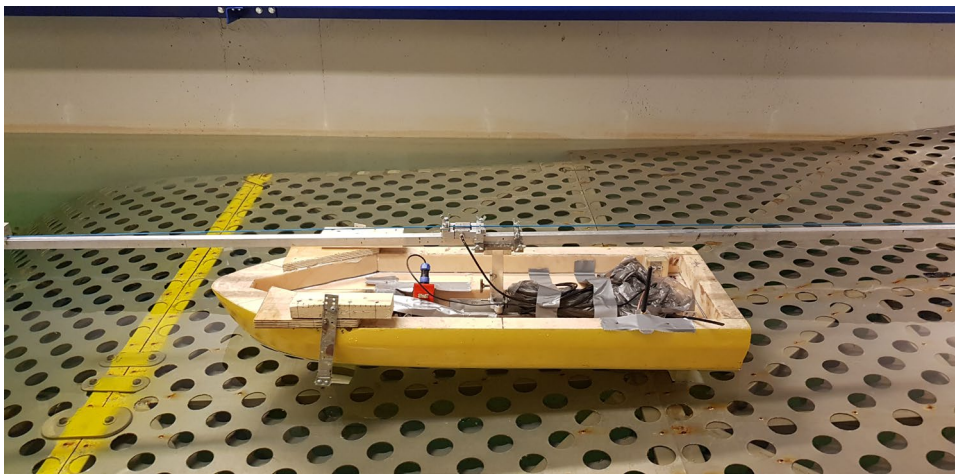
Tidlig 1900-tallet kom det som blir regnet som en av de mest revolusjonerende oppfinnelsene innen havteknikkens historie, nemlig hydrofoilen. På samme måte som flyvinger skaper en løftekraft i luften for å løfte flyet, vil hydrofoiler skape en løftekraft i vannet som gjør at ved høye nok hastigheter vil deler av skroget løftes over vannoverflaten. Dette vil senke motstanden mellom vannet og skipet og dermed effektivisere den maksimale hastigheten skipet er i stand til å bevege seg i.

Denne tankegangen ble realisert av Enrico Forlanini i 1905 med hans første prototypen av et hydrofoil fartøy av typen stigefoiler, hvor flere identiske foiler er plassert ovenfor hverandre for å få ønsket løftekraft [1]. Lite fornøyd med å nå en toppfart på 68 km/t kom han tilbake med en ny og forbedret utgave i 1911 som ble målt til 80 km/t. Med dette beviste han at italienerne igjen har et unikt talent for å skape grunnlaget for nytenkning. Forlaninis design fanget fort interessen til flere nytenkende idealister, en av disse er Alexander Graham Bell som på den tiden allerede var kjent for å ha funnet opp telefonen. Han perfektionerte Forlaninis design av hydrofoilbåten ved å utføre en rekke forandringer til designet hvor han valgte å ta i bruk en stigeprofil hvor foilene ikke er identiske, men minker i lengde nedover for å minimere motstanden samtidig som å beholde løftekraften [2]. Noe som resulterte i at han laget det som blir regnet som det første vellykkede hydrofoilfartøyet. Dette designet ble målt ved en test i 1919 med en toppfart på 114 km/t, i en tid hvor det raskeste dampskipet hadde en toppfart 48 km/t.

Utviklingen av hydrofoilen etter Forlanini og Bell var en langsom affære, ettersom at bruken av hydrofoiler til båter ikke var vanlig før 1950 [3]. Den kalde krigen førte til at hydrofoiler ble høyt ettertraktet da den Amerikanske marinen begynte å utvikle avanserte hydrofoilartøy med fullt neddykkete foiler [4]. Deres design banet vei for dagens hydrofoil design, ved å designe et system med mindre motstand enn systemet til Forlanini og Bell. Et design hvor stige prinsippet er blitt byttet ut med en foil med større overflate på enden av et stag, i stedet for flere med liten overflate.

I dagens samfunn er ikke hydrofoiler et redskap kun spesialister har kjennskap til. Det er heller et redskap som blir brukt i en rekke bruksområder som seilbåter, vannski, brettseiling og motoriserte fartøy. Det blir nylig utført tester i Trondheim på en ny batteridrevet hurtigbåt som vil ta i bruk en stor hydrofoil i tyngdepunktet av båten og en «hale» akter for å holde den stabil [5]. Et system som er veldig forskjellig for designet til den Amerikanske marinen hvor de hadde en hydrofoil akter og en hydrofoil i baugen både styrbord og babord. Dette vil prinsipielt redusere energibehovet til batteridrevne fartøy med rundt 50%. Hydrofoil teknologien er stadig i endring og behovet for å tenke nytt er større en noen gang.

Problemstillingen denne rapporten baseres på er å se på bruken av hydrofoiler på en arbeidsbåt fra det verdensledende sjømatelskapet, Lerøy, for å øke hastigheten båten kan operere i når den ikke bærer på ekstra last. Det blir forsket på de stabilitets- og hydrodynamiske kriteriene som er nødvendig for at båten skal holde seg stabil ved høye hastigheter, og den nødvendige løftekraften som trengs for å løfte skroget. I tillegg undersøkes hvor på skroget hydrofoilene må plasseres og hvilken foil design som vil være mest effektiv for bruksområdet til dette fartøyet. Dette med tanke på at fartøyet fortsatt skal kunne utføre det arbeidet som trengs: arbeid på merd, frakte personell, reservedeler, utstyr, dødfisk og utføre kranarbeid. Det undersøkes også på en prinsipiell løsning på hva som skal hende om båten blir utsatt for en kollisjon, om foilene være så kraftige at de klarer å motstå de kreftene de blir utsatt for eller om de vil knekke av på en bestemt måte. Dette forsøket blir utført på modellskala i bølgetank-simulatoren som er tilgjengelig i marinlaben på Høgskolen på Vestlandet avdeling Bergen med modellen vist i Figur 1.



Figur 1: Modellen montert i tanken med lastcelle

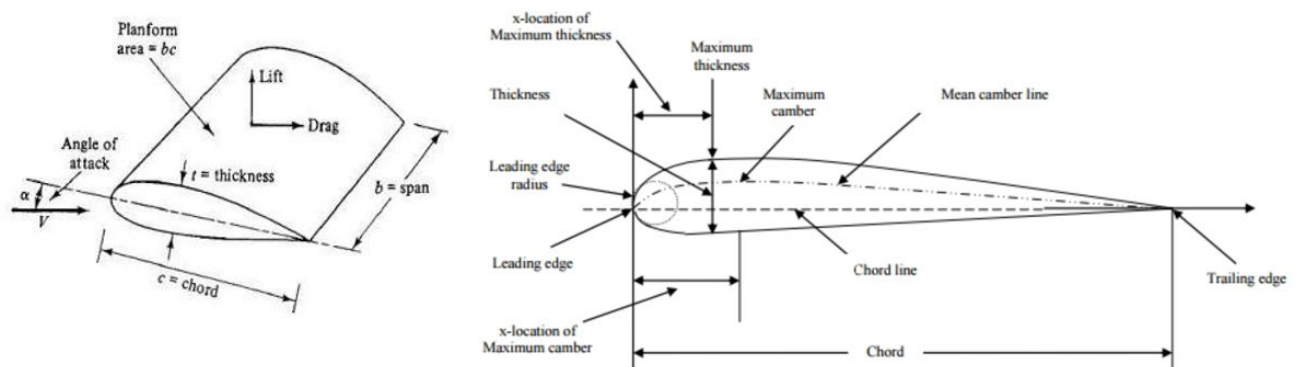
## 2. Teori

Dette kapitlet viser grunnleggende teori om hydrofoiler. Her blir det skrevet om geometrien til foiler, generell kunnskap om Bernoullis ligning og dens påvirkning til løft, hvordan strømmingen oppfører seg rundt foilen og motstand.

### 2.1 Geometri av foil

Utformingen av en hydrofoil kan variere veldig da det er mange parametere som kan justeres. Endringer av disse parametere påvirker løftekoeffisienten,  $C_L$  og dragkoeffisienten,  $C_D$ , og det er viktig at denne utformes for å gi mest mulig løft samt minst mulig drag. Dette er for å gi foilen mest effektiv framdrift. Av disse mange parametere er kordelengden (Engelsk: Chord) og angrepsvinkelen (Engelsk: Angle of attack) veldig sentrale. Kordelengden bestemmer ofte makstykkelse også, da foiler ofte har den oppgitt som prosentandel av kordelengden. Denne sammen med bredden til foilen (Engelsk: Span) brukes til å regne ut overflatearealet som gir en direkte effekt på størrelsen av løft. Vinkelen foilen har i forhold til strømmingen av fluidet blir kaldt angrepsvinkel. Denne påvirker løft ved å endre løftekoeffisienten,  $C_L$ .

Som vist i Figur 2 under kan det også justeres på krumningen til foilen (Camber), her inngår også hvor på foilen maksimal krumning skal være. Man kan også justere radiusen i fremre del av foil og hvor symmetrisk foilen skal være om kordelinjen.

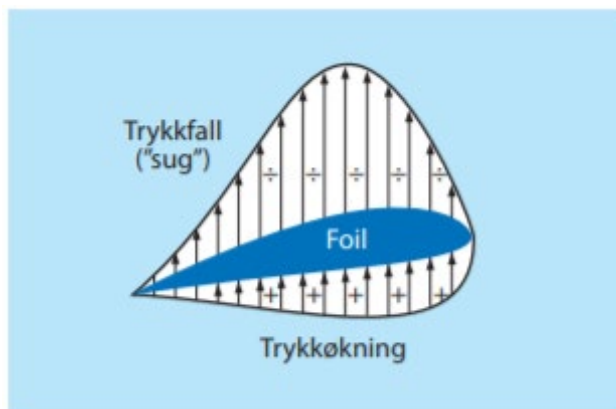


Figur 2: Geometri parametere til en foil [6]

## 2.2 Hydrofoilteori

Når et fluid strømmer på en foil vil fluidet måtte dra en lengre vei på oversiden enn det den må på undersiden. Bernoullis ligning, Formel 1, forteller om sammenhengen mellom kinetisk energi, potensiell energi og trykk [7]. Her er forutsetningene at strømmingen er en ikke-viskøs strømming, der fluidet er en inkompressibel væske samt ikke er turbulent.

$$\frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gz = \text{konstant} \quad (1)$$



Figur 3: Trykkfordeling på en foil når et fluid strømmer på den [8]

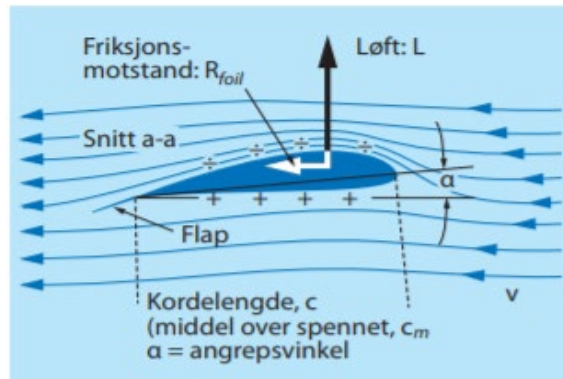
I realiteten vil det alltid være noe friksjon, så strømmingen vil være viskøs og at det vil oppstå noe turbulens. Denne ligningen vil ikke gi realistiske svar, men gir en tilnærming. Hvis farten,  $v$ , øker fører dette til at trykket,  $p$ , minker. Dette er et resultat av at alt skjer i samme plan ( $z=0$ ) og tettheten til fluidet er konstant ved lik temperatur. Denne endringen i hastigheten vil altså skape et lavere trykk på oversiden enn det er på undersiden, som vist på Figur 3.

Man vil da ende opp med en trykkforskjell og siden trykk betegnes med kraft per kvadratmeter [ $N/m^2 = Pa$ ], vil dette resultere i en resultantkraft som peker oppover og virker en tredjedel av kordelengden inn på foilen. Denne resultantkraften blir kalt løft (Engelsk: lift) og er vist i Formel 2. Denne løftekraften er ikke bare skapt av Bernoullis prinsipp, men også av Newtons tredje lov. Dette har med at strømlinjen følger foilen og dermed endrer retning når den forlater foilen helt bak (Engelsk: Trailing edge), dette kan sees på Figur 4 og vil generere en resulterende kraft i motsatt retning, altså løft [8]. Løftekraften blir gitt ved

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

Her er  $C_L$ , løftekoeffisienten til foilen, denne er avhengig av utforming av hydrofoilen, angrepsvinkel ( $\alpha$ ) foilen har i forhold til vannstrømmingen og i liten grad Reynoldstallet. Hvordan dette forholdet er vil bli sett nærmere på i kapittel 2.3.1.  $A$  er arealet av foilen sett ovenfra og  $V$  er hastigheten på fluidet som strømmer på foilen.





Figur 4: Illustrasjon av strømning på en hydrofoil [8]

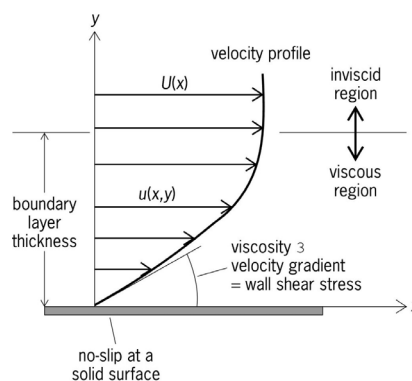
En annen viktig komponent er drag kraften som også er illustrert på samme figur. Denne vil som vist gi motstand, men denne motstanden er betydelig mindre enn hva friksjonsmotstanden fra skroget er. Skrogets drag komponent fra vannet vil forsvinne når foilene oppnår en viss hastighet og gir nok løft til å heve skroget over vannlinjen.

## 2.3 Grensesjikt teori

For å forstå hvordan strømningen rundt en hydrofoil oppfører seg, tar dette underkapittelet opp grunnleggende strømningsteori, Reynoldstallet, steiling og steilings konsekvenser.

### 2.3.1 Grensesjikt og strømning

Vannet som treffer foilen, eller hvilken som helst flate, skaper et grensesjikt. Partiklene som legger seg helt inne ved flaten har en hastighet lik null (gitt at objektets flate ligger i ro) på grunn av viskøs friksjon mellom vannpartiklene og overflaten. Dette kalles også no-slip condition [9]. Over denne overflaten er det et viskøst område hvor væskens hastighet blir påvirket av friksjonskrefter, et såkalt grensesjikt. Ved et punkt med konstant  $x$  vil trykket være konstant, mens hastigheten øker monotont med avstanden fra overflaten i  $y$ -retning, vist i Figur 5. Etter hvert blir avstanden fra overflaten så stor at væskens hastighet ikke lenger blir påvirket av dette og hastigheten er lik fristrøms hastigheten. Tykkelsen av et grensesjikt er mikroskopisk lite og defineres som avstand fra overflaten til der fluidhastigheten i grensesjiktet er tilnærmet lik fristrøms hastigheten. Denne avstanden avhenger av om grensesjiktet er turbulent eller laminært. Når vannet strømmer over hydrofoilen vil strømningen være laminær over store deler av foilen, men vil ha et omslagspunkt hvor det går over til turbulent strømning. Hvordan dette grensesjiktet oppfører seg er veldig komplekst og avhenger blant annet av omslagspunktet hvor det går fra laminær til turbulent strømning, Reynoldstallet, kurven til hydrofoilen, overflateruhet og fart.

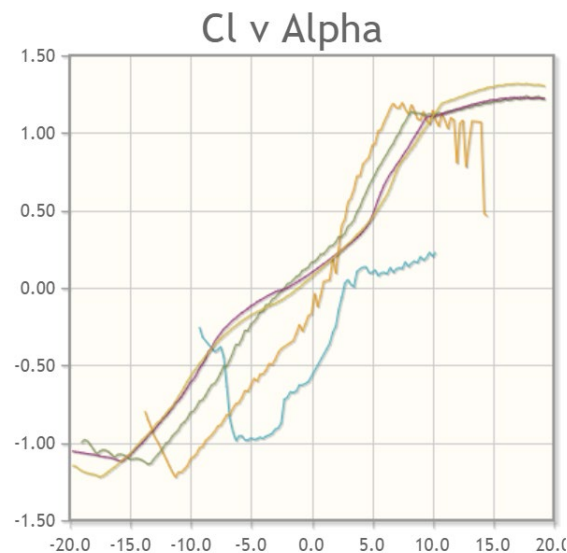


Figur 5: Hastighetsprofil i grensesjiktet [10]

Den viktigste faktoren når det gjelder hvorvidt strømmingen rundt foilen er laminær eller turbulent er Reynoldstallet. Formelen for dette tallet er gitt ved:

$$Re = \frac{V * L}{\nu} \quad (3)$$

Her er V farten på strømmingen, L er kordelengden til foilen og  $\nu$  er den kinematiske viskositeten til fluidet. Dette tallet er viktig da det har en påvirkning på  $C_l$  ved ulike vinkler. Ved lave Reynoldstall kan  $C_l$  v Alpha-kurven til en foil oppføre seg ustabil noe som er godt illustrert i Figur 6. Her viser de spesielle avvikene blå- og oransje kurve lave Reynoldstall på henholdsvis 50 000 og 100 000.



Figur 6: Løftekoeffisient mot angrepsvinkel med hensyn til Reynoldstallet, NACA 2424 [11]

### 2.3.2 Steiling

Etter hvert som det vurderes løft og angrepsvinkel, er det også viktig at det ikke oppstår steiling.  $C_l$  øker lineært med angrepsvinkel alfa helt til den treffer en viss verdi hvor maksimal verdi av  $C_l$  oppnås. Etter dette begynner hydrofoilen å steile og  $C_l$  minker raskt. Samtidig øker dragkoeffisienten drastisk etterhvert som alfa øker over steiling, se Figur 7. Denne dragkoeffisienten er ofte tilnærmet konstant for små angrepsvinkler, men kan være avhengig av høye Reynoldstall for stabilitet.

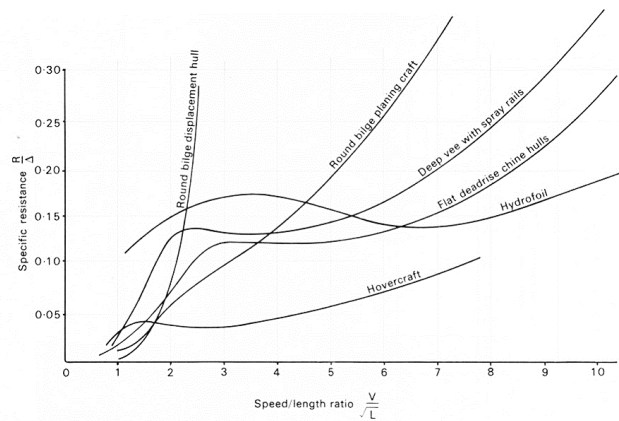


Figur 7: Utsteilet foilprofil [12]

Hvordan hydrofoilen steiler er avhengig av hvordan grensesjiktet separerer seg fra den øvre siden av hydrofoilen. Så lenge separasjonspunktet holder seg mot bakre kant av foilen etter hvert som angrepsvinkelen øker, vil ikke steilingen svekke løftet merkbart. Når angrepsvinkelen blir for stor vil vannet slutte å strømme over overflaten og istedenfor reversere tilbake og skape en voldsom turbulent strømning. Det er denne strømningen som skaper stort drag bak foilen, samtidig som man mister løftet. Denne effekten forventes ikke å oppstå under forsøkene på grunn av små angrepsvinkler.

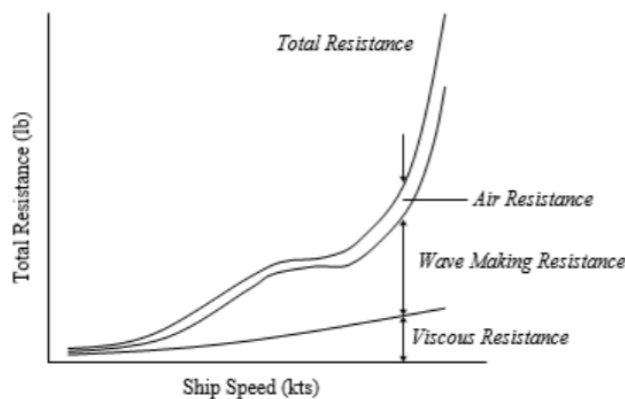
## 2.4 Motstand

Hensikten med å montere hydrofoiler på båt som dette vil være å øke både toppfarten og stabiliteten ved slike høye hastigheter, samt som en konsekvens av dette øke båtens effektive energiforbruk. Dette vil hovedsakelig bli gjort ved å redusere motstanden mellom skroget og vannet når det heves over vannlinjen. I Figur 8 kan man se denne spesielle motstandskurven hydrofoilbåter har. Denne er ekstra høy med lave hastigheter grunnet økt dragmotstand fra hydrofoilene. Når fart/lengde-forholdet blir på rundt 4-5 løftes skroget og motstanden reduseres. Deretter øker motstanden sakte. I forhold til hvor raskt den teoretiske motstanden til båten uten foiler stiger, vises som «Round bilge planing craft», vil det å montere hydrofoiler være lurt med hensyn til spesifikk motstand.



Figur 8: Motstandskurve for ulike båtdesign [13]

Motstanden kan deles opp i tre deler: Viskøs motstand, bølgemotstand og luftmotstand. Som vist i Figur 9, er bølgemotstanden størst. Ved å heve skroget vil luftmotstanden øke noe da luften vil ha mer areal og plante seg på, men denne motstanden er neglisjerbar i forhold til bølgemotstanden. Når skroget er over vann vil bare stagene og foilene utgjøre den store motstanden, og totalt vil denne være betydelig mindre.



Figur 9: Komponenter til skrogmotstands metoder [14]

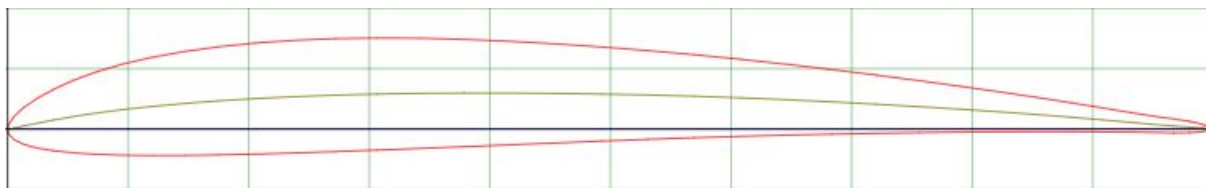
Her vil de teoretiske- og eksperimentelle-metodene blir presentert. Hvor det vil bli tatt for seg prosessen for valg av hydrofoiler og de teoretiske dataprogrammene som er blitt tatt i bruk gjennom forsøket. Det vil også bli vist til hvordan skalering og byggeprosessen av modellen er blitt gjennomført og hvordan en går frem ved gjennomføring av tester av den fremstilte modellen. Samtidig som test prosessens feilkilder vil bli lagt frem, faktorer som kan ha påvirket testresultatene.

## 2.5 Teoretisk metode

Kapitlet tar for seg prosessen ved å velge de foilene som er best egnet for til å utføre eksperiment. Samtidig som det blir forklart hvordan foilens geometri er blitt valgt. I tillegg til en teoretisk analyse av hvordan det forventes at foilene vil oppføre seg ved forskjellige hastigheter og angrepsvinkel, basert på beregninger.

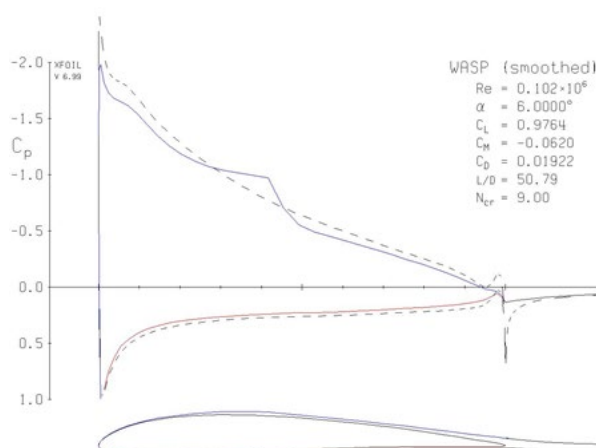
### 2.5.1 Utvalg av foil

For å finne en hydrofoil med god løfteevne for lave Reynoldstall, benyttes Airfoiltools til å velge gode og kompatible foiler [15]. Foilene publisert på denne nettsiden er hovedsakelig beregnet til aerodynamisk bruk, men oppførselen til foilene forventes å være lik på grunn av små angrepsvinkler, som ble forklart i delkapittel 2.3. Airfoiltools gir x/y-kordinater av foiler som brukes i dataprogrammet XFOIL, ett program som brukes for å designe og analysere de potensielle foilene for modellen for å finne den mest egnede [16]. Her visualiseres trykkfordelinger, separasjonspunkt, turbulens og nøyaktige verdier for løft, trykkdrag og friksjonsdrag. Utvalgt foil profil kan ses i Figur 10.



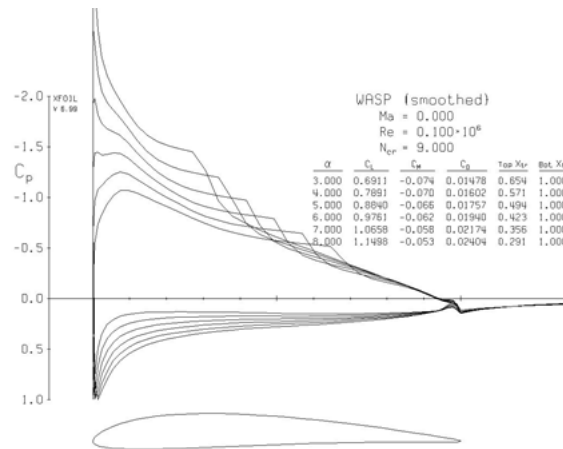
Figur 10: WASP smoothed profil[17]

Denne trykkfordelingen blir visualisert i Figur 11, en analyse av modellens utvalgte foil, WASP (smoothed), for en angrepsvinkel på  $6^\circ$ . Her kan man se trykkfordelingen langs foilen (nederst) og stagneringspunktet ved ledende kant, hvor trykkoeffisienten  $C_p=1$ . Det kan også ses et separasjonspunkt langs oversiden av foilen, ca. 30% ned langs foilen (hvert steg langs x-aksen er 10%).



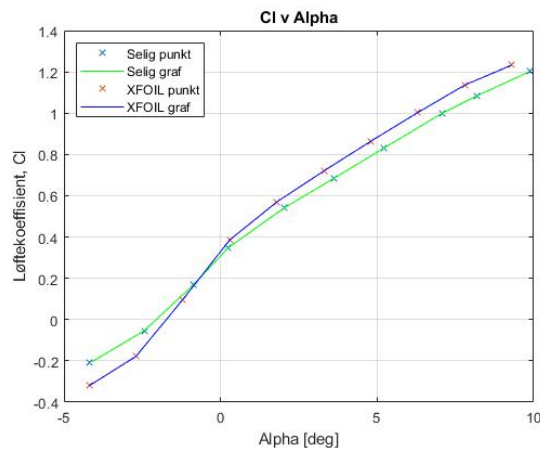
Figur 11: Trykkfordeling langs WASP-foil med en angrepsvinkel på  $6^\circ$

Videre brukes XFOIL til å bekrefte oppførselen til foilen ved flere angrepsvinkler og i tillegg gir oversikt over løft-, drag- og momentkoeffisienter, se Figur 12 og Vedlegg 1. Men gruppen valgte å ikke operere med disse.



Figur 12: Trykkfordeling over flere angrepsvinkler. Koeffisienttabell til høyre

Koeffisientene fra XFOIL er nemlig beregnet gjennom en 2D vortex-panel metode, som er en metode for å beregne ideelle strømmer [18]. Dette prosjektet baseres på koeffisientene fra en Selig-rapport, se vedlegg 2, som er basert på reelle målinger på en 3D-vinge-modell laget av samme foil [6]. Forskjeller mellom disse er normalt siden både modell-baserte og program-baserte beregninger og målinger har hver sine feilkilder. I Figur 13 er disse verdiene vist i samme  $C_L$  v Alpha graf. Tabellene legges inn i beregningsprogrammet MatLab, hvor verdiene interpoleres i en felles graf for å se nøyaktige  $C_L$ -verdier mellom de oppgitte vinklene [19]. WASP egner seg med tanke på tykkelse og form, da skaleringen og 3D-printeren begrenser hvor tynne foiler som kan brukes. Den viser også grunnlag for gode egenskaper innenfor stabilitet og ett ideelt forhold mellom løftekoeffisient og angrepsvinkel, alpha.



Figur 13 Cl v Alpha graf, Løftekoeffisienter fra Selig-rapport og XFOIL

I denne oppgaven ønskes det å undersøke angrepsvinkler hvor dette forholdet er mest mulig lineært, samtidig som løftekoeffisienten er relativt høy. Derfor blir angrepsvinkler mellom  $3.63^\circ$  og  $8.20^\circ$  undersøkt, hvor de tilhørende løftekoeffisientene,  $C_L$ , er mellom 0.685 og 1.085.

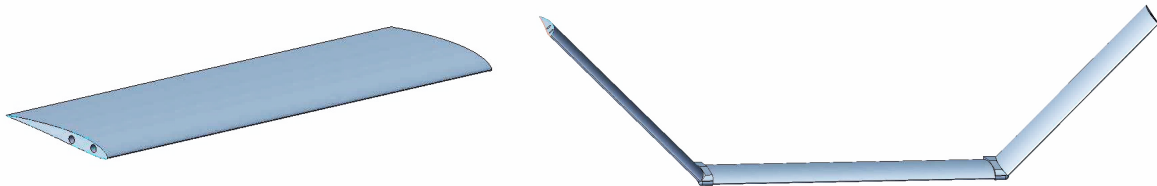
## 2.5.2 Design av foiler

X/Y-koordinater til foilen tas i bruk i det parametriske 3D-modelleringsprogrammet Creo, hvor foilen designes i 3D med ønsket bredde (span) og kordelengde. De ønskede målene til foilene i forhold til skaleringen av båten, beregnes i MatLab. Egenskapene kan bli sett i Tabell 1.

WASP (smoothed)			
	Horizontal foil V-profil	Skråfoil V-profil	Foil T-profil
Korde [m]	0.07	0.07	0.07
Span [m]	0.2	0.15	0.25

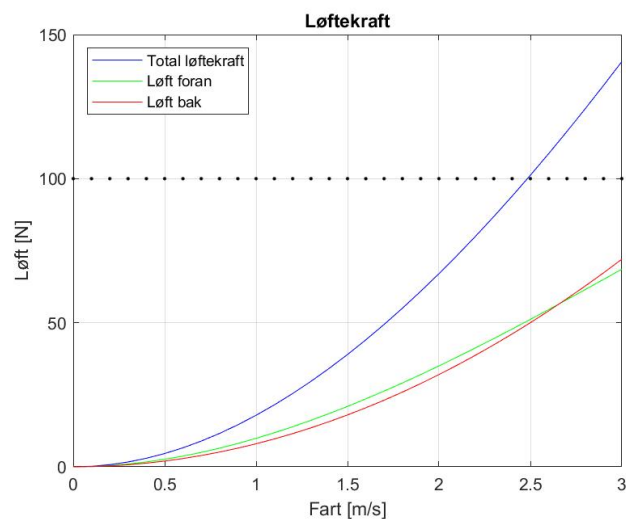
Tabell 1: Design hydrofoiler

Her tas det utgangspunkt i at foilene må løfte modellens beregnede totalvekt på 10.21 kg. Ut fra tidligere eksperimenter og observasjoner av andre skip og modeller, velges det å ta i bruk foiler med en V-profil design under baugen for å ha stabilitet ved løfteprosessen og en T-profil under hekken for å skape et løft i akterenden for å unngå steiling, da dette har bevist til å være et mer effektivt design, se Figur 14 [20].



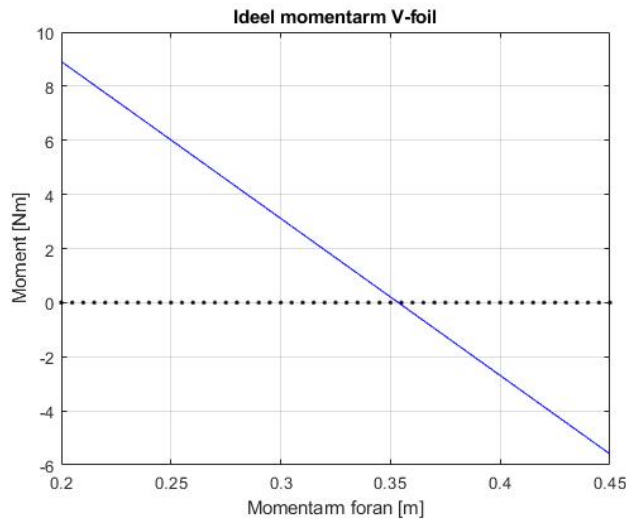
Figur 14: T-profil (venstre) og V-profil (høyre) av foilene

For å oppnå ideelt løft blir foilene designet slik at løftet blir tilnærmet likt bak og foran på båten, noe som også skal bidra til momentbalanse. V-profilen foran vil gi mer løft enn T-profilen når den er fullt neddykket, men dette vil utbalansere seg etter hvert som hastigheten stiger, båten og foilene løfter seg og det effektive løftearealet til skråfoilene reduseres. Derfor er det effektive løftearealet av disse kodet i MatLab som en vektor avhengig av fart som reduseres. Løftet er beregnet til å stabilisere seg ved halve bredden av foilene. Den totale vekten tilsier ca. 100 N og foilene er designet til å gi et løft som stabiliserer seg på en hastighet på  $2.5 \text{ m/s}$ . Se Figur 15.



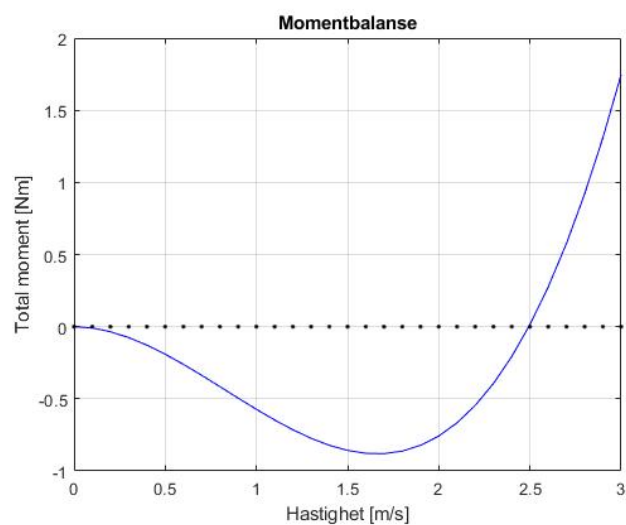
Figur 15: Totalt løft, sammenlagt av løft foran og bak

Som tidligere nevnt, vil V-profilen i baugen gi mer løft når den er fullt neddykket, og derfor er det forventet steiling i starten av testingen. For å kompensere dette, kan man enten redusere angrepsvinkel på V-profilen eller øke angrepsvinkel på T-profilen. Dette for å skape en momentbalanse om tyngdepunktet. Her er det flere parametere som varierer: Plassering av V-profil i x-retning og forskyvning i z-retning og angrepsvinkler kan endres på begge profilene. T-profilens plassering i x-retning har blitt satt som konstant da denne er vanskelig å forskyve siden den går gjennom båten skrog. Dermed er det viktig å velge en momentarm fra tyngdepunktet frem til V-profilen som gir balanse. Dette kan ses i Figur 16.



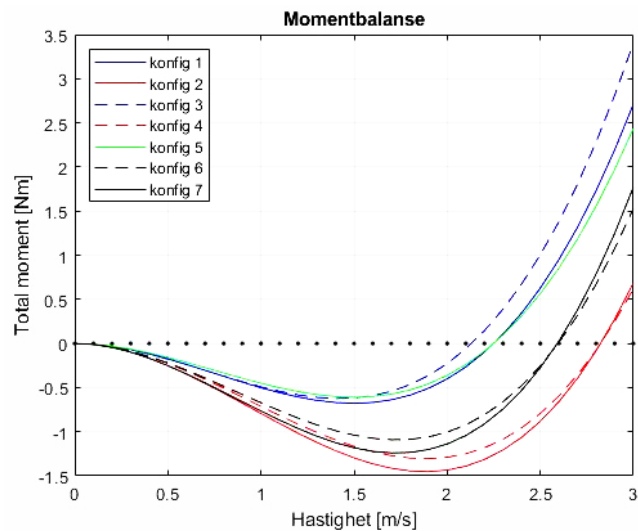
Figur 16: Ideell momentarm fra tyngdepunkt til V-profil, i dette tilfellet ca. 0.312 m

Her, i Figur 17, kan man se at modellen vil oppleve større løftkraft foran, og dermed steile. Steilingen vil akselerere frem til ca.  $0.75 \text{ m/s}$ , hvor det oppstår et vendepunkt i momentet som så begynner å avta. Ved ca.  $1.7 \text{ m/s}$  begynner de skrå foilene å heve seg så mye over vannoverflaten at T-profil bak begynner å utbalansere momentet. T-profilen er designet med større bredde (span) for nettopp dette. Ved ca.  $2.5 \text{ m/s}$  vil momentbalansen være perfekt, og båten skal ligge stabilt med en høydeforskyvning på ca. 9.3 cm. Her vil foilene være neddykket ca. 3.5 cm.



Figur 17: Momentbalanse ut fra hastighet og løftkraft ved foil profilene

Videre er det også viktig å teste ut forskjellige konfigurasjoner av vinkler i tillegg til disse momentarmene. Derfor er flere konfigurasjoner aktuelle for å oppnå balansen, og disse er satt opp i samme graf under Figur 18.



Figur 18: Forskjellige konfigurasjoner av parameterne gir forskjellige verdier i momentbalansen

Tabell 2, viser til de forskjellige konfigurasjon mulighetene det vil eksperimenteres på. Her er  $\alpha_f$  angrepsvinkelen til den fremre V foilen, og  $\alpha_b$  er da angrepsvinkelen til den bakre T-foilen. Det kan også bli gjort forandringer på momentarm  $f$ , som er avstanden fra tyngdepunktet i modellen til plasseringen av V-foilen.

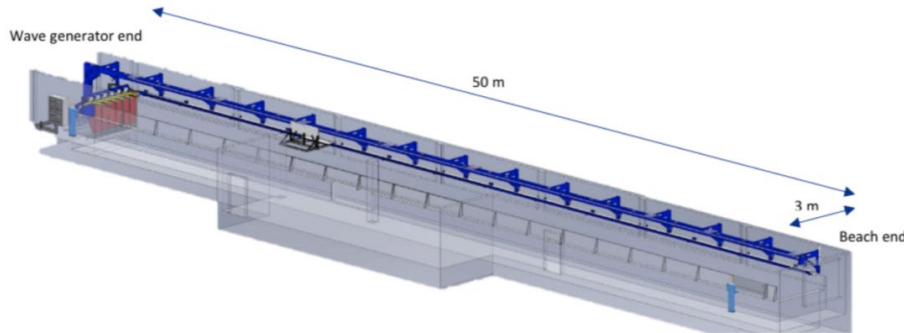
Konfigurasjon	Alpha f	Alpha b	Momentarm f
1	6	6	300
2	6	6	325
3	6	7	325
4	5	5	325
5	5	5	300
6	7.5	6	275
7	5	7.5	400

Tabell 2: Forskjellige konfigurasjoner av parametere



## 2.6 Eksperimentell metode

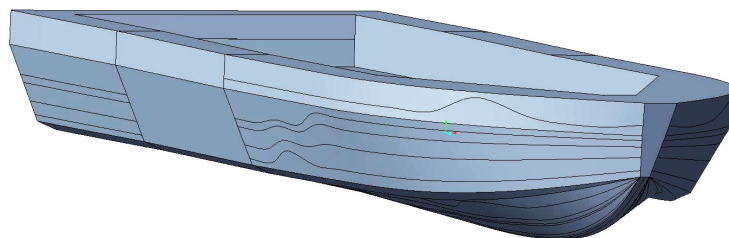
Rapporten baseres på eksperimentelle tester i modellskala. Tanken, Figur 19, har et mål på 2.2x3x50 meter [21]. Tanken er utstyrt med to slepemuligheter, en slepevogn av Edinburghs design, som sleper med konstant hastighet og har en kapasitet til å frembringe en toppfart på  $5 \text{ m/s}$  og en maksimal akselerasjon på  $1.2 \text{ m/s}^2$ . I tillegg til et slepesnorsystem som har en mulighet til å nå  $1 \text{ m/s}$  ved hjelp av motorkraft. For å oppnå høyere hastigheter vil motorkraften bli byttet ut med et akselerasjonslodd,  $m_{al}$  og masselodd,  $m_{bl}$ , som blir sluppet fra en høyde og dermed slepe båten med konstante krefter. Dette er en dynamisk akselerasjonsprosess.



Figur19: Bølgetank i MarinLab

### 2.6.1 Skalering til modellskala

Denne oppgaven baseres på en modell av en Lerøy-arbeidsbåt i HAVtruck-klassen. Maritime Engineering AS har tilført med en modell av båten i programmet CREO, se Figur 20.



Figur 20: 3D-skisse av modellen i CREO

Hvor modellen er skalert med en skaleringsfaktor på 11.52 av den originale båten, for å forenkle freseprosessen. Slik at den kan bli frest som en enkel del, enn å måtte frese modellen som to deler og lime disse delene sammen. Båten skaleres også med hensyn på at den skal være innenfor de spesifikasjonene som kreves for å utføre tester i tanken. For, som kan bli sett i Tabell 3, er båten veldig bred i forhold til sin totale lengde. Derfor blir det tatt hensyn til at bredden til modellen ikke blir så bred at modellen vil lage tilbakeslag på bølgene den danner og påvirke resultatene.

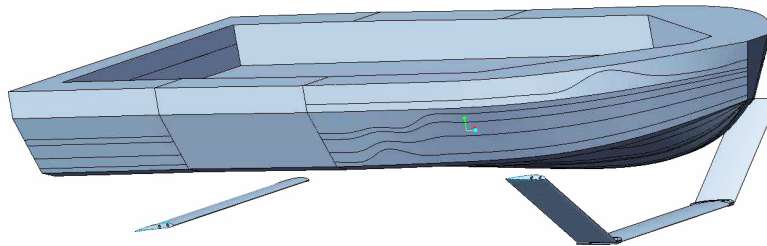
	Vekt [kg]	Lengde [m]	Bredde [m]	Høgde [m]	Dypgang [m]
<b>Original</b>	16 000	13	4.84	1.8	0.85
<b>Modell</b>	10.21	1.125	0.416	0.156	0.055

Tabell 3: modell vs. originale parametere

### 2.6.2 Modell

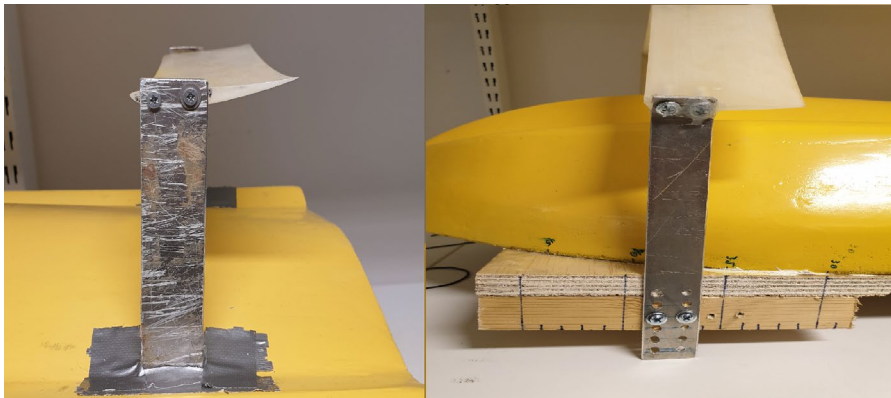
Den ferdig skalerte modellen blir konstruert i et kompositt materiale, divynycell H60, og frest ut for å få en eksakt formlikhet. Videre blir båten sparklet med en to-kompositt-sparkel, HV 427-1 og SV 427-2, og lakkert med en utbedringslakk fra Biltema til ønsket tetthet og glatt overflate er oppnådd. Slik at det vil ha minst mulig påvirkning på båtens fortrenging av vannet.

Båtens skalering og form setter en begrensning på foilenes design, den krever relativ tynne foiler for å skape den nødvendige løftekraften som trengs, foilens egenskaper kan bli sett under 3.1.2, Tabell 2. Foilenes design er ikke mulig å utforme ved fresing og derfor blir de laget med en 3D-printer på HVL, i et kompositt plastmateriale, VisiJet M3-X. Foilenes design og plassering under skroget kan bli sett i Figur 21.



Figur 21: 3D-skisse av modell med foiler i CREO

For å feste foilene til modellen er det tatt i bruk aluminiumsplater, på grunnlag av materialets lette vekt og dens myke egenskap som gjør den lett å tilpasse. Platene har en tykkelse på 3 mm for å minimere påvirkningen det vil ha på dragmotstand. De designes slik at det er mulig å tilpasse innfestningen til forskjellige høyder i z-retning og forandre avstanden i x-retning for å forlenge momentarm fra tyngdepunktet, se Figur 22.



Figur 22: Foil innfestninger

For å oppnå modellens beregnede totalvekt på 10.21 kg er det nødvendig med å ta i bruk ballast for å nå ønsket vekt. Lettskipsvekten til modellen er 6.362 kg, derfor er det nødvendig å forsyne modellen med en ballast på 3.848 kg, hvor ballasten er kobberlodd og slepestangen. Loddene blir plassert i modellen med en plassering som er beregnet ut fra det allerede beregnede tyngdepunktet, for å ikke bli utsatt for ustabilitet som kan føre til kantring. Samtidig lokaliseres dreiemomentpunktet til modellen for å oppnå den mest effektive plasseringen til slepestangen.

### 2.6.3 Fremgangsmåte

Det vil bli tatt i bruk slepesnoren som går langs senter av tanken med en høyde på 40 cm over vannoverflaten for å utføre eksperimenter. Grunnet løftkraften modellen påvirkes av vil denne høgden øke når modellen akselerer og føre til at det blir en motstand mellom slepesnor og slepestag som er innfestet i modellen. Derfor er det blitt tatt hensyn til dette at slepestaget har en lavere høyde enn slepesnoren, noe som krever at snoren blir dratt ned og satt i et spenn.

På grunn av hydrofoilenes tynne 3D-printede design er det visse usikkerheter om foilene vil klare å tåle påkjenningen av kreftene som virker på dem. Derfor utføres de første testene uten å ta i bruk en lastcelle for å måle motstand, dermed vil det kun bli analysert hvordan hastighetsprofilen ser ut over en tid. Dette blir gjort ved at en optisk encoder på bakre hjulet av slepegiret måler spenningskrefter i slepesnoren og sender disse til en datamaskin, som fremstiller dette i en graf. Grunnen til dette valget er at lastcellen er en ømfintlig innretning som man ikke vil risikere å skade dersom de første testene ikke følger forventninger. Testene uten lastcellen blir brukt for å lære å kjenne de masse- og akselerasjons-vektene som vil gi best resultat. Det startes med å bruke lette akselerasjons- og massevekter for å se hvordan modellen oppfører seg, for så å ha en kontinuerlig økning til den ønskede hastigheten på  $2.5 \text{ m/s}$  er oppnådd. Målet er at foilene tåler de påkjenningene de blir utsatt for og dermed gir mulighet for ytterligere loggførte tester. Når den mest stabile og optimale konfigurasjonen er funnet, kan lastcellen installeres. Denne brukes til å måle motstanden som virker på slepesnoren med en maksbelastning på 200 N, for så å sende signaler til en NI 9237 måleforsterker fra National Instrument. Koblet til en wifi-transmitter, sender den signalene videre til en datamaskin som loggfører signalene og fører de inn i en motstandsgraf. Dermed vil et bilde av hvordan motstanden til modellen er bli dannet.

Dermed starter loggførte motstandstester for å se om foilene vil påvirke modellens motstandskurve. Det startes med å utføre de mest positive testene fra tidligere tester uten lastcelle. Det utføres også tester med forskjellige vinkler på foilene for å se hvordan modellen oppfører seg ved vinkelforandring og for å finne de best egnede vinklene. Vinklene til foilene forandres ved å løsne litt på skruene som er lokalisert nærmest bakenden av foilene for å kunne vinkle foilen til den ønskede vinkelen. For å måle denne vinkelen blir modellen lagt på en flat overflate og støttet opp slik at den er i vater for å gjøre det enklere å måle vinkelen. For å så montere en digital vinkelmåler på en linjal som blir lagt på foilen slik at linjalen treffer både «leading edge» og «trailing edge» samtidig. Ved å gjøre dette skapes en kordelinje med linjalen og angrepsvinkelen kan leses av vinkelmåleren.

Vinklene som det testes ved blir bestemt ut fra observasjoner underveis i testingen og ved hjelp av utregninger i matlab, som viser ved hvilke vinkler og momentarm løftkraften vil være mest effektiv. Her vil målet være å finne den angrepsvinkelen og plasseringen som er mest effektiv ved  $2.5 \text{ m/s}$ .

Det vil også bli utført tester på modellen uten bruk av hydrofoiler. Her vil hydrofoilene bli demontert av båten, hullene akter til den bakre foilen vil tettes igjen og foilenes vekt vil bli erstattet med kobber lodd med en tilsvarende vekt. Målet er å skaffe gode motstandsresultat for å sammenligne bruken med og uten hydrofoiler og dermed kunne vurdere om godt hydrofoiler vil effektivisere båten.

## 2.7 Feilkilder

Ved utførelse av eksperimenter basert på forskning vil det være en rekke parametere som kan påvirke eksperimentelle resultater. Dette kapittelet vil derfor ta for seg de forskjellige feil som kan påvirke utfallet.

### 2.7.1 Modell

Denne modellen blir laget av sammenlagte plater som er limet sammen, og deretter formet i en fres. Når det skal freses detaljert i et område hvor disse platene er limet kan større biter falle av. Dette skjedde med modellen, og den måtte da fikses manuelt med mer lim. Dette, sammen med små unøyaktigheter fra fresen, kan ha skapt en form som har noe avvik fra originalt tenkt modell. Deretter er det gruppen selv som pusset, sparklet og lakket båten. Dette håndarbeidet er med på å påvirke formen med noe avvik fra original tegning av modell.

Platen mellom innfestningen og modellen er laget så liten som mulig, men innfestningspunktet på slepestangen er fortsatt over oppdriftssenteret til modellen og gir noe uønskede momentkrefter. Dette påvirker momentbalansen til modellen og kan ha gitt noen forstyrrelser i resultatene.

### 2.7.2 Hydrofoiler design

3D-printing av hydrofoilene kan anses som veldig nøyaktig, men det oppstod et problem når voksen skulle smeltes av i ovnen. På grunn av varmen har foilene blitt noe bøyd langs bredden. Selv om de er bøyd er foilene symmetriske så gruppen valgte å fortsette med disse. Dette kan påvirke strømmingen og gi noe avvik i løftkraft gitt av foilene.

V-foilen har to sammenkoblinger, Figur (14), disse er festet med lim og teip for å henge sammen og avstive foilene. Koblingene gir noe endring på strømmingsbildet på og omkring dem, samt øker motstand foilene blir utsatt for. Dette påvirker det effektive løftearealet fra denne foilen og reduserer total løftkraft med uvisst størrelse. Måten V-foilen er montert på, med fester i endene og uten avstivning på kobleleddene, er foilen litt svak og kan ha endret seg noe i y-asken under påkjenning. Dette kan ha endret vinkelen på skråfoilene og gitt ulike løftkomponenter i y-retning, som får båten til å svinge og virke ustabil.

### 2.7.3 Angrepsvinkel

Grunnet små vinkler, foiler og at de fikk en bue på seg viste vinkelmåleren noe endring av angrepsvinkel langs en enkelt foil. Dette ble tatt hensyn til og den totale til foilen er et gjennomsnitt langs bredden. Skaleringen gjør at testene ble gjort med små hydrofoiler, hvor det er visse unøyaktigheter ved måling av angrepsvinkel,  $\alpha$ . Designet gjør det også vanskelig å måle vinkelen på fremre foil, altså V-foilen.

### 2.7.4 Slepeteknikk

Både akselerasjons- og masse-loddene henger i et tau og er trukket opp i en åpning i taket. Denne åpning er smal og når loddene trakk slepesnoren oppstod det svingninger i disse. Til tider var loddene borti veggene og dermed bremses akselerasjonen/hastigheten til modellen. Dette var med på å gjøre to tester som skulle vært like, ulike.

Lastcellen som måler snordraget har litt drift i målingene før en test ble startet. Det ble gjort nullstillinger for å få den så nært som null som mulig ved start, så det ble sett vekk fra dette i målingene.

### 3. Resultat

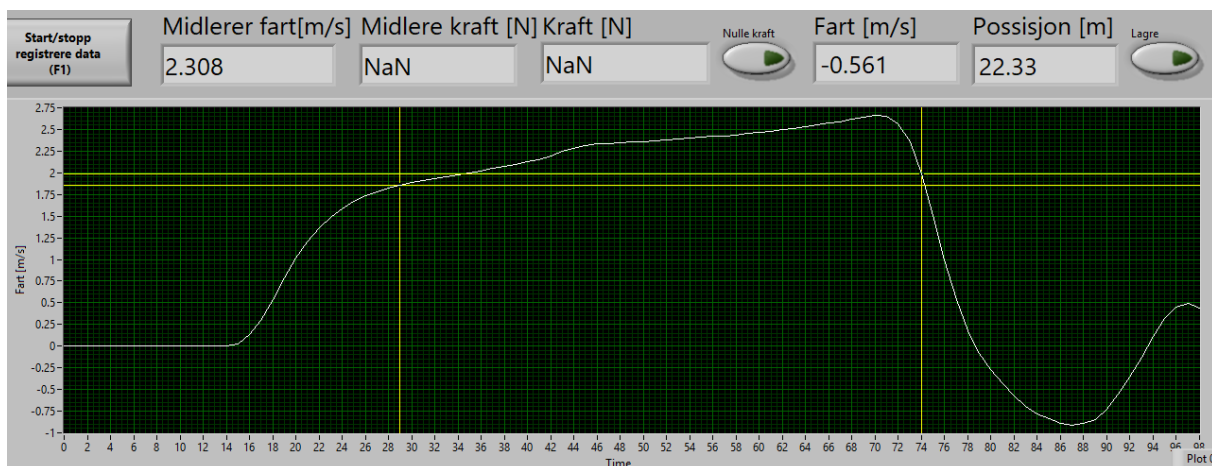
I denne seksjonen vil resultatene fra slepetestene bli presentert. Først fokuseres det på stabilitet og symmetri for å få en foil-konfigurasjon som skapte likevekt og minst mulig krenkning og svingning. Deretter fokuseres det på selve angrepsvinklene og x-forskyvningen av V-profil foilene. Når riktig konfigurasjon blir funnet med stødig stabilitet og fart,  $v_m$ , blir lastcelle installert for å måle motstanden og hvordan denne endrer seg etter hvert som båten øker farten og løfter seg over vannet. Til slutt blir denne motstanden også målt på båten uten foiler for sammenligning.

#### 3.1 Stabilitet og symmetri

For å oppnå best mulig stabilitet og minst mulig svingning under slepingen, er symmetrien til konstruksjonen fundamental. De første 29 testene preges av steiling og ikke tilstrekkelig løft bak. Dette er trolig på grunn av at  $m_{total}$  (totalmassen i hastighets- og akselerasjonsloddene) ikke er høy nok. Usikkerhet rundt nødvendig slepekraft og lite erfaring med slik foil-konstruksjon, gjør at en forsiktig start med lite masse virker fornuftig. Etter hvert som hastigheten økes blir båten veldig ustabil og svinger mot babord. Siden slepesnoren og slepestativet er i senter av tanken, tvinger den båten til å krenge mot styrbord når den svinger.

Test nr.	Alpha f [°]	Alpha b [°]	Arm f [mm]	Vm [m/s]	$m_{al}$ [g]	$m_{ml}$ [g]	$m_{total}$ [g]	Kommentar
30	8	6	355	2.4	3068	6070	9138	Fin kurve og minimalt med krenng. Holdt seg oppe hele testen.

Tabell 4: Resultat test nr.30



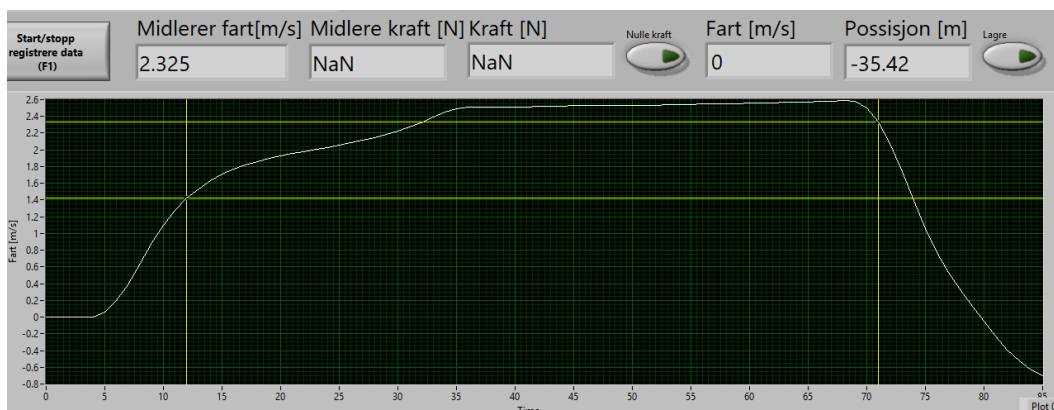
Figur 23: Test 30. Hastighetsgraf med ujevn topphastighet. (Midlere fart på Figur er målt over feil intervall, se Tabell 5)

Videre gjøres utbedringer på V-foil ved å korrigere på symmetrien og legge til teip på vinklene på for å øke styrken, for å teste om dette kan hjelpe på at hydrofoilens symmetri ikke påvirkes. I tillegg forskyves baugvekten 3mm mot styrbord for å utlikne ujevn løft. De neste 15 testene (test 30-45) går på å flytte masse fra fart til akselerasjons-loddet for å få en flatere hastighetskurve enn det som ble oppnårt i test 30. Høy fart ( $> 3 \text{ m/s}$ ) gjør båten ustabil, noe som skyldes at akselerasjons-loddet, nevnt i kapittel 3.2, ikke har truffet bakken når båten løfter seg helt opp bak. Nå opplever båten mye mindre motstand samtidig som den fortsatt akselererer og dermed oppnår for høy hastighet. Dette korrigeres ved å flytte akselerasjons-loddet lengre ned på snoren, så loddet treffer bakken i samme øyeblikk som båten løfter seg bak. Deretter er det kun hastighets-loddet som drar med en tilnærmet konstant fart. Dette viser at båten er ekstrem sensitiv til slepekraft etter fullstendig løft og at dette er kritisk for

stabiliteten. Nå svinger ikke båten mer, som gjør krengingen minimal. Utfordringen er å tilpasse akselerasjons- og konstant-fart-kraften til tidspunktet båten løfter seg ut av vannet og motstanden minker. Den beste balansen har blitt funnet for en vektfordeling tilnærmet lik 1/3 akselerasjonskraft og 2/3 konstant kraft.

Test nr.	Alpha f [°]	Alpha b [°]	Arm f [mm]	Vm [ $m/s$ ]	$m_{al}$ [g]	$m_{ml}$ [g]	$m_{total}$ [g]	Kommentar
45	8	6	355	3	3604	5458	9062	God hastighetskurve, høy fart skaper litt ustabilitet tverskip
46	8	6	355	3	3604	5458	9062	Likt resultat som test 45
47	8	6	355	2.4	3732	5338	9070	Konstant fart etter løft, god fartsurve.
48	8	6	355	2.2	3648	5422	9070	Ikke nok akselerasjon. Rakk ikke å løfte seg bak før akselerasjons-loddet falt.
<b>49</b>	<b>8</b>	<b>6</b>	<b>355</b>	<b>2.6</b>	<b>3772</b>	<b>5422</b>	<b>9194</b>	<b>Krenget et lite øyeblikk når hekken løftes, men stabiliserer seg fint. Holdt løftet helt ut. Fin kurve.</b>

Tabell 5: Resultater test 45-49



Figur 24: Test 49, markert fet skrift i Tabell 6. Hastighetskurve med god jevn hastighet på cirka  $2.6 m/s$ . (Midlere fart på Figuren er målt over feil intervall)

### 3.2 Motstandskurve

Konfigurasjonen er nå stabil og god nok til å installere lastcelle. Grunnet en feil oppdaget i ballasten til modellen, ble det utført en rekke tester for rette opp i riktig massefordeling i hastighets- og akselerasjonsloddene. Med små korreksjoner i angrepsvinkler og x-forskyvning oppnås de mest stabile testene så langt, se tabell 7. Båten kjører stabilt med minimalt krenge og trim, men oppnår en høyere hastighet enn beregnet i Matlab ved momentbalanse. Dette kan komme av usikkerheten i målingen av parameterne, som er blitt nærmere forklart under 4.5.

Nå som lastcellen er installert, blir også motstand (midlere kraft) målt under fartsgrafen, se Figur 25. Her observeres det en eksponentiell demping av motstandskraften idet øyeblikket båten løfter seg over vannoverflaten og hastigheten ligger stabilt på  $2.8 m/s$ .

Test nr.	Alpha f [°]	Alpha b [°]	Arm f [mm]	Vm [ <sup>m</sup> /s]	$m_{al}$ [g]	$m_{ml}$ [g]	$m_{total}$ [g]	Midlere kraft [N]	Kommentar
88	7.5	8	345	2.7	5058	7010	12068	11.76	Løftet seg helt og kjørte stabilt. Høy toppfart.
99	7.5	6+	345	3.1	5272	7153	12425	9.52	Løftet seg helt og kjørte stabilt. Høy toppfart.
100	7.5	6+	345	3.1	5058	6945	12003	10.77	Samme resultat som test 99, fortsatt høy fart
101	7.5	6+	345	3.0	5058	6945	12003	10.80	Samme resultat som test 99, fortsatt høy fart

Tabell 6: Gode resultater fra motstandstester, test 88 og 99 - 101

Konstruksjonen av foilene, målefeil fra lastcelle, ujevnheter og ruhet på skrog og foiler er faktorer som har spilt inn på grunnen til at de eksperimentelle resultatene ikke stemmer med Matlab-beregninger. Samtidig har beregningene kun vært gjort i et enkelt beregningsprogram og ikke blitt skikkelig simulert gjennom en CFD-analyse, hvor krefter og strømningsoppførsel kan ses nærmere på.

Motstandskurven ble veldig forstyrret under løftet. Trolig er det vibrasjoner i konstruksjonen som skaper den ujevne dempingen av kraften. Kompositten hydrofoilene er laget av, samt de tynne aluminiumsplatene, er skjøre og påvirkes lett av påført kraft. Innfestningens posisjon, som er høyere enn oppdriftspunktet, kan også skape uønskede momenter som skaper forstyrrelser i målingene. Tross disse forstyrrelsene ble en reduksjon i totalmotstand på 40% målt så snart båten løftet seg helt ut av vannet og en hastighetsøkning på hele 31.5%.



Figur 25: Test nr. 88, markert fet skrift i Tabell 7. Hastighet (øverst) og motstandskraft målt samtidig. Eksponentiell motstandsdempning ved jevn hastighetsgraf



### 3.3 Uten foil

Videre fjernes hydrofoilene fra modellen for utføre tester hvor sammenligning av motstand og hastighet for modellen med og uten hydrofoiler, undersøkes. Testene 99-101 brukes som referanse. Her testes det på to måter: Først brukes samme størrelse på massene i hastighet- og akselerasjons-loddet for å se hvor mye mer motstand båten opplever og om hastigheten samtidig blir mye mindre med samme slepekraft. Den andre måten er å se hvor mye slepekraft som må til for å oppnå samme hastighet som testene 99-101, og hvor mye motstand båten opplever nå. Tabell 5 og Figur 25 viser første type forsøk, med samme massefordeling som tidligere sletetester. Her observeres det betydelig mindre fart og noe mer motstand. Fordi båten steiler veldig mye, mister den mye hydrodynamiske egenskaper og skjærer ikke lenger gjennom vannet. Derfor oppnås ikke samme hastighet og samtidig øker motstanden.

Test nr.	Vm [m/s]	$m_{al}$ [g]	$m_{ml}$ [g]	$m_{total}$ [g]	Midlere kraft [N]	Kommentar
124(99)	2,2	5272	7153	12425	11,87	Stabilt tverrskips. Ekstrem steiling. Oppnår ikke samme fart, høyere motstand.
125(101)	2,0	5058	6945	12772	11,57	Stabilt tverrskips. Ekstrem steiling. «Skipper» over vannoverflaten ved akselerasjon. Oppnår ikke samme fart, høyere motstand.
<b>127(88)</b>	<b>1,9</b>	<b>5058</b>	<b>7010</b>	<b>12068</b>	<b>11,94</b>	<b>Stabilt tverrskips. Ekstrem steiling. Høyere topphastighet, men mister den raskt. Opplever høyere motstand.</b>

Tabell 7: Resultater for sleping uten foil. Test i parentes er testene hver enkelt test sammenlignes med



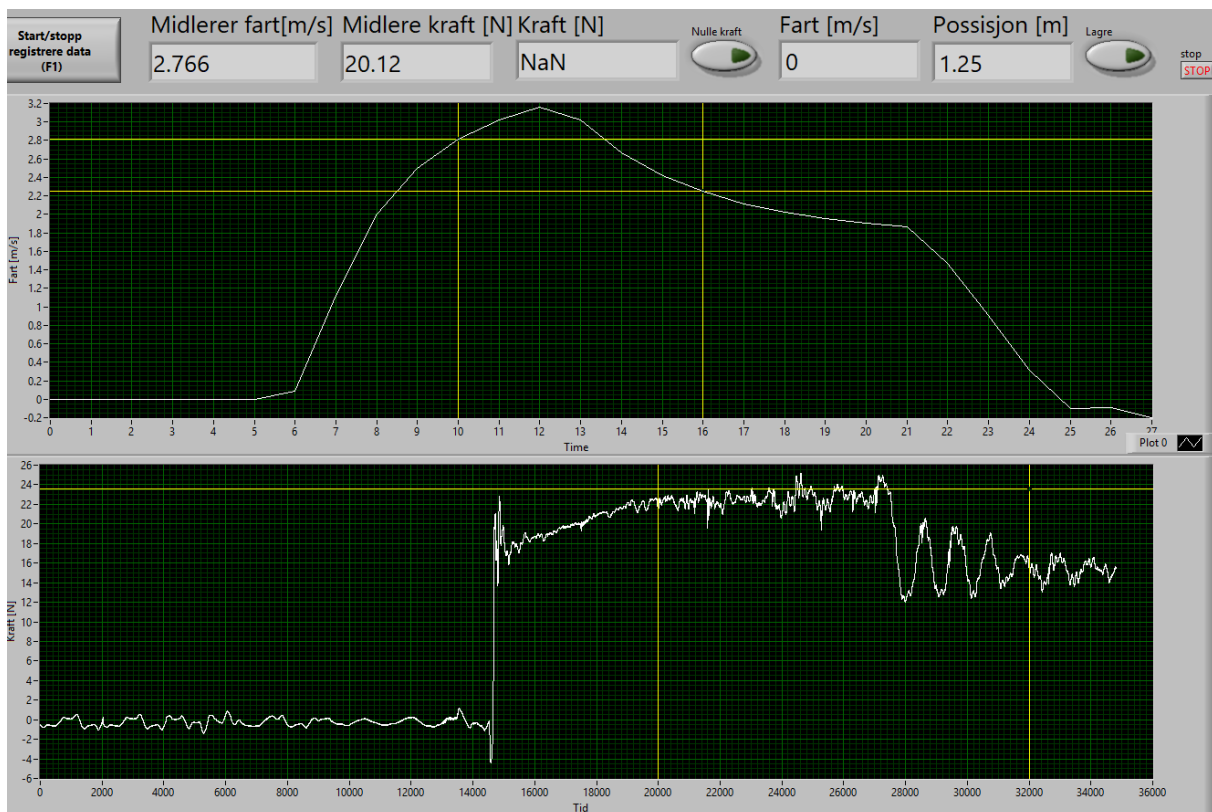
Figur 26: Test 127. Målingene er tatt over samme tidsintervall som test 88 for sammenligning av fart og motstandskraft



Påfølgende testes det om båten kan oppnå samme fart og hvilken slepekraft som kreves for å oppnå dette, samt hvor mye motstand båten opplever. Her blir den nødvendige slepekraften veldig stor, som fører til stor motstand og mye vannsprut fra undersiden av båten.

Test nr.	Vm [m/s]	$m_{al}$ [g]	$m_{ml}$ [g]	$m_{total}$ [g]	Midlere kraft [N]	Kommentar
128	2,3	3064	9018	12082	15,69	Flyttet masse fra hastighets- til akselerasjons-loddet. Når ikke riktig hastighet og opplever enda høyere motstand. Ekstrem steiling.
129	3,0	7062	10452	17514	16,11	Legger til masse på begge lodd. Når for høy fart. Motstand øker lite trolig på grunn av «skipping» over vannoverflaten. Ekstrem steiling.
130	2,8	5038	9018	14056	20,12	Fjernes masse fra begge lodd, når ønsket fart. Steiling øker det projiserte arealet for vannstrømmen og øker motstanden betydelig. Stor vannsprut

Tabell 8: Utførelse av tester 128-130



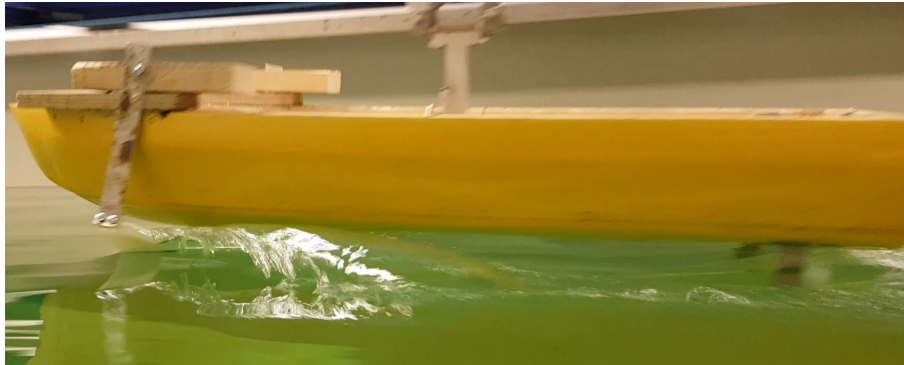
Figur 27: Test 130, markert fet skrift i Tabell 9. Hastighets- og motstandsgraf uten foiler

Sammenlignet med en båt uten foiler, kan hydrofoilbåten kjøre på en totalmotstand som er 41.5% mindre. Dette er tatt ut fra sammenligning mellom test 88 og 130, som oppnådde tilnærmet lik hastighet. Ved å sammenligne motstandseffekten for test med foiler, 32.105 W, og ved situasjonen uten foiler, 55.650 W, kan det bli sett en forbedring på 23.545 W. Dette viser at de teoretiske antagelsene om at det vil være mer effektivt å ta i bruk hydrofoiler, faktisk stemmer.

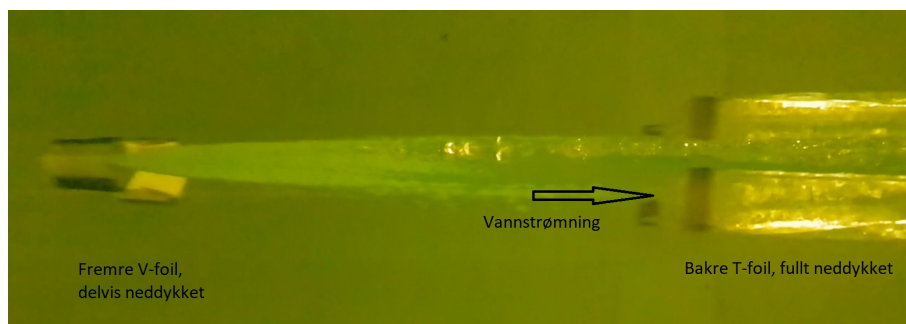
### 3.4 Overflateeffekt

Under enkelte av forsøkene blir det observert et raskt og fullt løft bak i hekken og deretter et drastisk «dropp» hvor hekken faller ned i vannet igjen. Under disse forsøkene er foilene stilt inn til høye angrepsvinkler både ved V- og T-foil. Årsaken til dette er trolig at den bakre foilen genererer for mye løft og kommer for tett opp mot vannoverflaten. Da svekkes løftekraften, som fører til fallet. Trolig kan dette unngås ved dypere neddykking av T-foilen.

En annen mulig årsak er at vannstrømmen kan påvirkes av den fremre foilen og suges ned i en bølgedal, som forårsaker en større angrepsvinkel på bakre foil. Figur 20 og 21 viser denne bølgedalen og vannstrømmen fra fremre foil, men ikke i tilfeller hvor dette påvirket den bakre foilen.



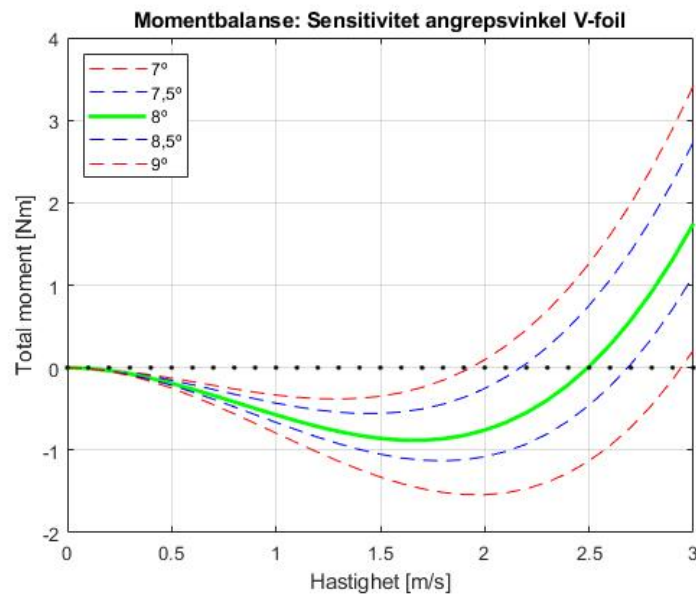
Figur 28: Test 41. Bølgedal forårsaket av fremre foil som kan endre angrepsvinkel på bakre foil



Figur 29: Test 41. Observasjon av den fremre foilens påvirkning av vannstrømningen til den bakre

### 3.5 Sensitivitet i parameterendringer

På grunn av skaleringen er foilene smale og tynne og dermed har små endringer på parametere stor effekt på resultatene, se Figur 22. Denne grafen viser til hvor små forandringer som skal til på vinkelen til V-foilen før det påvirker momentbalansen. Den grønne grafen er et utgangspunkt for den vinkelen det helst vil at foilen skal holde seg på for å gi et godt resultat og momentbalanse på hastigheten  $2.5 \text{ m/s}$ , mens de stiplede linjene, blå og rød, viser til hvordan det ville sett ut ved andre vinkler. Det kan da bli sett at bare ved en forandring på en halv grad har resultert i en stor forandring på hvilken hastighet momentbalanse vil inntreffe. Denne sensitiviteten gjelder for flere parametere, se Vedlegg 3. Her det blir vist til hvordan det ville sett ut ved en vinkelendring på T-foilen, endring på momentarmen til V-foilen og avviksprosenten på effektivt løfteareal på begge foilene.



Figur 30: Sensitivetsgraf for angrepsvinkelen til V-foil

## 4. Diskusjon

I denne seksjonen vil det bli tatt for seg en drøfting av mulige faktorer som kan ha påvirket resultatene under utførelsen av slepetester. Samtidig som mulige endringspotensialer både ved design av båt og utførelse av tester vil bli tatt for seg. Det vil også bli diskutert frem en prinsipiell teoretisk løsning på hvordan hydrofoilene vil håndtere en potensiell kollisjon.

### 4.1 Resultatpåvirkning og endringspotensiale

Under utførelsen av testene ble det observert at modellens oppførsel ikke samsvarte med de teoretiske kalkulasjonene i kalkulasjonsprogrammet, Matlab. En stor faktor til dette kan tenkes å være at V-foilen er for svakt konstruert, noe som kan føre til at foilen blir usymmetrisk når den blir utsatt for krefter. Dette kan gjøre at foilen vil få mer løft på forskjellige områder, dermed få et ustabil løft som kan føre til ustabilitet og utsette modellen for krenkning. En forbedringside til dette vil være å konstruere ny V-foil i én del, slik at de skjøre bindingsleddene mellom foildelene kan bli eliminert og dermed øke stivheten og gjøre den mindre utsatt for asymmetri. I tillegg til dette anbefales det å ha innfestning til V-foilen gjennom skroget slik som gjort på T-foilen. Dette vil gjøre de stivere og mer mottakelig for løftekraften på foilen dermed minimere bevegelsene i plattene og hjelpe på å holde på symmetrien til foilen.

Om mulig, ville det også vært ønskelig å se på muligheten til å lage en helt ny modell med samme form, med en mindre skaleringsfaktor. Da blir det mulig å lage alle komponentene større og foilene kunne da blitt laget i et sterkere materiale, for eksempel aluminium. Dermed vil foilene tåle å bli utsatt for større krefter under løftet og sannsynligheten for asymmetri blir mindre. Dette vil også øke stabiliteten i løfteprosessen.

Det antas også at kan ha blitt påvirket av mangel på utstyr i marinlaben. Det er eksempelvis ikke blitt utviklet en lagringsfunksjon til datamaskinen, slik at målinger ikke er mulig å hente frem ved senere anledninger. Derfor har det ikke vært mulig å produsere en nøyaktig fremstilling av hastighet- og motstandsgrafer, og skjermdumper fra. Dette har vært med på å skape utfordringer i målinger av båtens dypgangs reduksjoner ved løft, ved at det ikke kan måles gjennom programbaserte beregninger. Derfor gjøres dette gjennom en rekke visuelle observasjoner og gjennom estimering, for å få en forståelse for løfteprosessen til modellen.

### 4.2 Prinsipiell løsning ved kollisjon

Hydrofoiler i full skala vil kunne tåle å bli utsatt for en del krefter, men om full skala HAVtrucken blir utsatt for en potensiell kollisjon med hydrofoiler kan det ha stor påvirkning på hydrofoilenes form. Det skal ikke mye deformasjon til for at foilens løftekraft blir påvirket. En mulighet er å designe hydrofoilene med en slik styrke at de klarer å motstå en kollisjon og fortsatt beholde egenskapene. Selv om det er noen negative aspekter med denne løsningen. En kollisjon hvor foilene er designet til å tåle sammenstøtet vil da føre denne kraften videre til det svakeste punktet med konstruksjonen, sammenkoblingen mellom foilene og skroget. Dette kan føre til skader på skroget. Dette vil kreve et sterkt materiale, for eksempel stål, vil også veie mye mer enn den ideelle egenvekten til foilene og vil derfor kreve mer motorkraft.

En ide for hvordan foilene vil håndtere en mulig kollisjon vil være at de helt enkelt vil knekke av. Det blir så tenkt at hydrofoilene vil bli designet i to deler. En del med selve hydrofoilen med stenger for å festes til skroget og en litt mindre del som allerede er festet i skroget. Tankegangen her er at disse to delene skal kunne festes sammen. Denne overgangen vil da virke som et litt svakere ledd, slik at brudd oppstår ved kollisjon og dermed vil skåne skroget for skade. Det er viktig at det blir gjort nøyaktige styrkeberegninger på hele konstruksjonen slik at det oppstår brudd ved mindre kollisjoner, som når det skal legges til en merd. Tanken er også at dette leddet skal funke som et slags «quick release

system» hvor personell enkelt kan avkoble hydrofoilene om nødvendig. Noe som også kan gjøre det lettere med eventuelle servicer på skrog eller hydrofoiler. Dette er løsningen gruppen ville anbefalt.

## 5. Konklusjon

Forskjellige konfigurasjoner av parametere med hydrofoil arbeidsbåt er testet. Det har blitt konkludert med resultater som svarer til en reduksjon i totalmotstand på 40% etter fullstendig løft av skrog og en hastighetsøkning på 31.5% under samme test. Disse resultatene har vært konsistente og vist til å være repeterbar.

Det har vært utfordringer med å tilpasse akselerasjons- og hastighets-kraften til tidspunktet båten løfter seg ut av vannet og motstanden reduseres. Symmetrien til foil-konstruksjonen har også vært en faktor i fokus for gunstig stabilitet, samt masse-fordelingen i loddene. Den beste balansen har blitt funnet for en vektfordeling av 1/3 akselerasjonskraft og 2/3 konstant kraft.

Til videre forskning anbefales det å bruke en større skala for å gjøre parametere mindre sensitive for krefter og justeringer. Ytterligere innfestninger på V-foil vil gjøre konstruksjonen mer robust og lettere å måle foilenes angrepsvinkler på. Det anbefales også å slepe med konstant fart, da dette vil eliminere problemer med å måtte tilpasse akselerasjonen til tidspunktet båten løfter seg. Denne rapportens resultater kan brukes videre som utgangspunkt.

## Referanser

- [1] M. Zuppardo. "Enrico Forlanini's hydrofoil." Il Globo Editorial Team. <https://ilglobo.com.au/news/33183/enrico-forlaninis-hydrofoil/> (accessed 12.03, 2019).
- [2] L. N. Bonikowsky. "Hydrofoil." Bonikowsky, Laura Neilson. <https://www.thecanadianencyclopedia.ca/en/article/hydrofoil> (accessed 12.03, 2019).
- [3] A. Tikkanen and M. Sampaolo. "Hydrofoil." The editors of encyclopaedia britannica. <https://www.britannica.com/technology/hydrofoil> (accessed 12.03, 2019).
- [4] M. Churchwell. "Hydrofoils: Ships That Fly." Puget Sound Navy Museum. <https://usnhistory.navylive.dodlive.mil/2017/03/27/hydrofoils-ships-that-fly/> (accessed 29.04, 2019).
- [5] T. Stensvold. "Tester skalamodell av batteridrevet hurtigbåt." Stensvold, Tore. [https://www.tu.no/artikler/tester-skalamodell-av-batteridrevet-hurtigbat/463521?utm\\_source=newsletter-tudaily&utm\\_medium=email&utm\\_campaign=newsletter-2019-04-25&key=Hii0f3wv](https://www.tu.no/artikler/tester-skalamodell-av-batteridrevet-hurtigbat/463521?utm_source=newsletter-tudaily&utm_medium=email&utm_campaign=newsletter-2019-04-25&key=Hii0f3wv) (accessed 29.04, 2019).
- [6] D. C. Steward, D. Yue, and F. You. "Wing Shape Optimization." Steward, Daniel Charles Yue, DajunYou, Fengqi. [https://optimization.mccormick.northwestern.edu/index.php/Wing\\_Shape\\_Optimization](https://optimization.mccormick.northwestern.edu/index.php/Wing_Shape_Optimization) (accessed 23.05, 2019).
- [7] H. Holm and S. Steen, "Motstand og Framdrift," in *Havromsteknologi*. Trondheim: Norges tekniske nordiske Universitet, 2014, ch. Motstand og framdrift, p. 6.
- [8] H. Holm and S. Steen, "Mostand og framdrift," in *Havromsteknologi*. Trondheim: Norges tekniske nordiske Universitet, 2017, ch. 3, p. 22.
- [9] A. W. Krog, R. Lehar, and T. Sneltvedt, "CFD-analyse for Statens Havarikommisjon for Transport," ed. Grimstad: Universitet i Agder, Grimstad, 2009.
- [10] K. Chaitanya. "Boundary Layer Modeling using Inflation Layers." CADFEM India. <http://www.cadfem.in/blog/organic/fbu/modeling-boundary-layer-inflation/> (accessed 24.02, 2019).
- [11] A. Tools. "NACA 2424." <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca2424-il> (accessed 01.03, 2019).
- [12] "Flow separation." wikipedia. [https://en.wikipedia.org/wiki/Flow\\_separation](https://en.wikipedia.org/wiki/Flow_separation) (accessed 17.05, 2019).
- [13] T. Forum. "Hull Speed." <http://www.trawlerforum.com/forums/s3/hull-speed-really-21945-3.html> (accessed 01.03, 2019).
- [14] U. S. N. Academy. "Resistance and Powering of Ships." [https://www.usna.edu/NAOE/\\_files/documents/Courses/EN400/02.07%20Chapter%2007.pdf](https://www.usna.edu/NAOE/_files/documents/Courses/EN400/02.07%20Chapter%2007.pdf) (accessed 02.03, 2019).
- [15] W. a. Wet. "Airfoil Tools." <http://airfoiltools.com/index> (accessed 03.03, 2019).
- [16] M. Drela. "XFOIL." <http://web.mit.edu/drela/Public/web/xfoil/> (accessed 06.03, 2019).
- [17] A. Tools. "WASP (smoothed)." <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=waspsm-il> (accessed 23.02, 2019).
- [18] P. M. Applet and W. J. Devenport. "Vortex Panel Method." <http://www.engapplets.vt.edu/fluids/vpm/vpminfo.html> (accessed 15.03, 2019).
- [19] T. M. W. Inc, "MATLAB - Primer R2016a," ed: Versjon 9.4, Mars 2018.
- [20] T. o. o. N. R. N. Department, "Hydrofoil Handbook," vol. 1, ed, 1954, p. 1.13.

- [21] "MarinLab." Høgskulen på Vestlandet. <https://www.hvl.no/om/marinlab/> (accessed 01.04, 2019).



## Vedlegg

### Vedlegg 1: XFOIL beregninger

XFOIL Version 6.99

Calculated polar for: WASP (smoothed)

1 1 Reynolds number fixed Mach number fixed

xtrf = 1.000 (top) 1.000 (bottom)  
 Mach = 0.000 Re = 0.100 e 6 Ncrit = 9.000

alpha	CL	CD	CDp	CM	Top_Xtr	Bot_Xtr
-4.200	-0.3208	0.03715	0.03108	-0.0390	1.0000	0.0914
-2.700	-0.1799	0.02150	0.01274	-0.0362	1.0000	0.0858
-1.200	0.0975	0.01464	0.00867	-0.0579	0.9599	1.0000
0.300	0.3872	0.01406	0.00692	-0.0806	0.8825	1.0000
1.800	0.5701	0.01386	0.00610	-0.0794	0.7596	1.0000
3.300	0.7198	0.01514	0.00687	-0.0731	0.6274	1.0000
4.800	0.8639	0.01719	0.00851	-0.0669	0.5094	1.0000
6.300	1.0028	0.02009	0.01154	-0.0607	0.4017	1.0000
7.800	1.1362	0.02401	0.01549	-0.0543	0.3053	1.0000
9.300	1.2325	0.02601	0.01809	-0.0428	0.1856	1.0000
10.800	1.2368	0.03728	0.02876	-0.0227	0.0575	1.0000

alpha: Angrepsvinkel  
 CL: Løfte koeffisient.  
 CD: Total drag koeffisient (Trykk- + viskøsdrag).  
 CDp: Trykk drag koeffisient.  
 CM: Moment koeffisient  
 Top\_Xtr: Separasjonspunkt på oversiden av foilen.  
 Bot\_Xtr: Separasjonspunkt på undersiden av foilen.

Vedlegg 2: Hydrofoil data ved lave Reynoldstall

Run: 329  
 Re = 202800  
 $\alpha$   $C_l$   $C_d$   
 -5.50 -0.349 0.0170  
 -3.76 -0.191 0.0134  
 -2.30 -0.046 0.0112  
 -0.72 0.177 0.0094  
 0.79 0.349 0.0092  
 2.20 0.491 0.0101  
 3.83 0.655 0.0112  
 5.24 0.785 0.0145  
 6.83 0.921 0.0192  
 8.34 1.032 0.0243  
 9.80 1.117 0.0326

Run: 331  
 Re = 304300  
 $\alpha$   $C_l$   $C_d$   
 -6.39 -0.420 0.0187  
 -3.59 -0.149 0.0123  
 -2.19 0.034 0.0079  
 -0.59 0.206 0.0076  
 0.82 0.338 0.0076  
 2.47 0.512 0.0083  
 4.16 0.681 0.0108  
 5.56 0.812 0.0138  
 7.65 0.992 0.0187  
 8.59 1.063 0.0225  
 10.32 1.159 0.0326  
 11.54 1.189 0.0448

**SD8020**  
 Fig. 4.145

Run: 252  
 Re = 61400  
 $\alpha$   $C_l$   $C_d$   
 -6.45 -0.633 0.0255  
 -4.93 -0.509 0.0181  
 -3.36 -0.352 0.0178  
 -1.81 -0.097 0.0178  
 -0.29 0.031 0.0138  
 1.17 0.107 0.0201  
 2.72 0.366 0.0139  
 4.37 0.513 0.0175  
 5.88 0.635 0.0205  
 7.39 0.743 0.0283

Run: 254  
 Re = 101700  
 $\alpha$   $C_l$   $C_d$   
 -6.55 -0.704 0.0184  
 -5.03 -0.562 0.0148  
 -3.32 -0.407 0.0135  
 -1.81 -0.237 0.0125  
 -0.41 -0.001 0.0102  
 1.21 0.144 0.0127  
 2.69 0.303 0.0140  
 4.10 0.423 0.0161  
 5.68 0.561 0.0183  
 7.27 0.679 0.0256  
 8.89 0.783 0.0408

Run: 256  
 Re = 203500  
 $\alpha$   $C_l$   $C_d$   
 -6.41 -0.659 0.0134  
 -4.95 -0.529 0.0110  
 -3.43 -0.387 0.0099  
 -1.62 -0.221 0.0087  
 -0.33 -0.042 0.0087  
 1.21 0.147 0.0079  
 2.58 0.287 0.0101  
 4.30 0.444 0.0123  
 5.77 0.574 0.0153  
 7.30 0.697 0.0212  
 8.86 0.807 0.0298

Run: 258  
 Re = 305200  
 $\alpha$   $C_l$   $C_d$   
 -6.77 -0.699 0.0139  
 -4.75 -0.514 0.0097  
 -3.27 -0.371 0.0087  
 -1.73 -0.206 0.0074  
 -0.22 -0.033 0.0074  
 1.18 0.101 0.0087  
 2.61 0.280 0.0091  
 4.45 0.454 0.0114  
 5.69 0.565 0.0136  
 7.24 0.696 0.0184  
 8.86 0.815 0.0261

**SD8020**  
 Fig. 4.148

Run: 287  
 Re = 61200  
 $\alpha$   $C_l$   $C_d$   
 -6.44 -0.619 0.0254  
 -4.64 -0.474 0.0207  
 -2.59 -0.286 0.0160  
 -0.49 -0.041 0.0146  
 1.58 0.230 0.0161  
 3.58 0.410 0.0157  
 5.63 0.583 0.0217  
 6.61 0.647 0.0232  
 7.78 0.728 0.0287  
 8.66 0.774 0.0388

Run: 289  
 Re = 203500  
 $\alpha$   $C_l$   $C_d$   
 -6.53 -0.657 0.0189  
 -4.58 -0.477 0.0159  
 -2.61 -0.272 0.0163  
 -0.50 -0.053 0.0170  
 1.56 0.143 0.0164  
 3.62 0.357 0.0169  
 5.68 0.553 0.0204  
 6.73 0.640 0.0239  
 7.76 0.721 0.0282  
 8.79 0.790 0.0337

**WASP**  
 Fig. 4.152

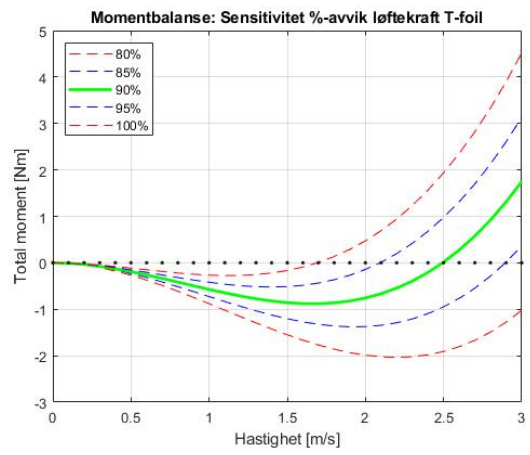
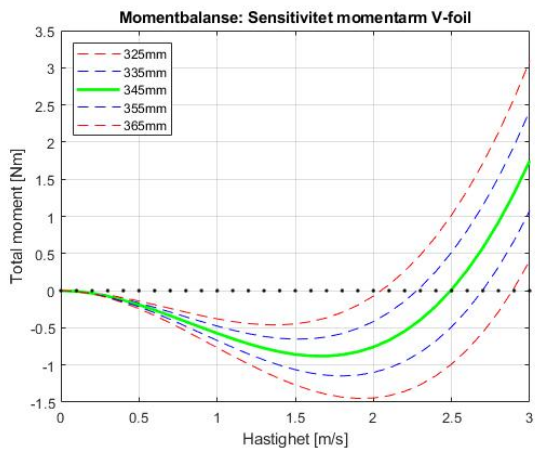
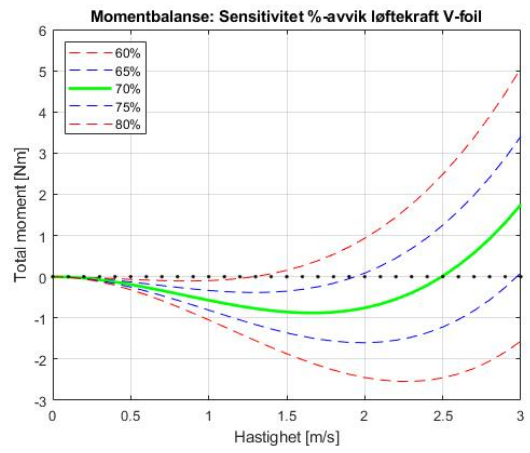
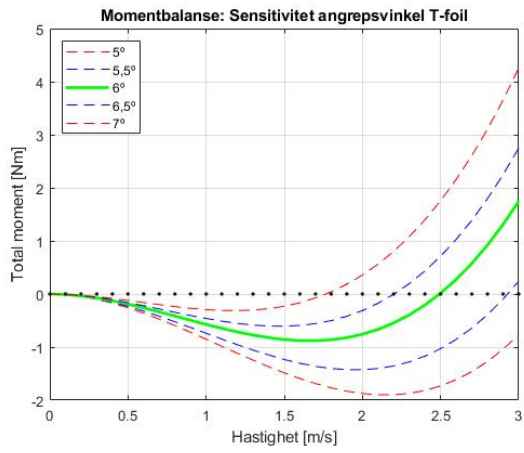
Run: 229  
 Re = 61200  
 $\alpha$   $C_l$   $C_d$   
 -4.30 -0.187 0.0294  
 -2.62 -0.047 0.0214  
 -1.01 0.106 0.0173  
 0.38 0.318 0.0217  
 1.99 0.554 0.0218  
 3.34 0.676 0.0236  
 4.92 0.807 0.0310  
 6.68 0.952 0.0365  
 8.13 1.066 0.0405  
 9.62 1.166 0.0385  
 11.24 1.238 0.0472

Run: 144  
 Re = 102000  
 $\alpha$   $C_l$   $C_d$   
 -4.18 -0.211 0.0245  
 -2.44 -0.054 0.0193  
 -0.87 0.167 0.0129  
 0.23 0.346 0.0144  
 2.05 0.543 0.0159  
 3.63 0.685 0.0171  
 5.23 0.832 0.0192  
 7.07 0.999 0.0235  
 8.20 1.085 0.0265  
 9.87 1.201 0.0296

Run: 231  
 Re = 203300  
 $\alpha$   $C_l$   $C_d$   
 -4.02 -0.175 0.0182  
 -2.65 0.006 0.0132  
 -0.29 0.288 0.0092  
 0.40 0.355 0.0095  
 2.63 0.588 0.0115  
 3.50 0.675 0.0123  
 5.11 0.830 0.0145  
 6.63 0.971 0.0170  
 8.26 1.106 0.0201  
 9.79 1.195 0.0270  
 11.09 1.219 0.0393

Run: 233  
 Re = 305100  
 $\alpha$   $C_l$   $C_d$   
 -4.31 -0.175 0.0154  
 -2.53 0.049 0.0109  
 -1.03 0.201 0.0090  
 0.90 0.400 0.0084  
 2.22 0.543 0.0095  
 3.60 0.680 0.0106  
 5.06 0.822 0.0124  
 6.46 0.956 0.0142  
 8.11 1.094 0.0173  
 9.51 1.184 0.0227  
 11.24 1.224 0.0377

Vedlegg 3: Sensitivetsgrafer



**Vedlegg 4: vedlagte filer utenfor rapport**

- Oppsummering av slepetester
- Matlab koder
- Data for arbeidsbåt
- Refleksjonsnotat for arbeidsprosessen
- Skjermdumper av slepetester





