

# Testing og skalering av appendiksmotstand ved Høgskulen på Vestlandet

Thomas Magnus Lloyd  
Emil Meyer Mortensen Larsson

Bacheloroppgave i Marinteknikk  
Bergen, Norge 2019







## Testing og skalering av appendiksmotstand ved Høgskulen på Vestlandet

Thomas Magnus Lloyd  
Emil Meyer Mortensen Larsson

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:* Testing and scaling of appendageresistance at Western  
Norway University of Applied Sciences (HVL)

Forfatter(e), studentnummer: Thomas Magnus Lloyd h181291  
Emil Meyer Mortensen Larsson h181310

Studieprogram: Marinteknikk  
Dato: Mai 2019  
Rapportnummer: IMM 2019-M32  
Veileder ved HVL: Mons Monstad  
Oppdragsgiver: Salt Ship Design AS  
Oppdragsgivers referanse: Andreas Stangeland Haavik

Antall filer levert digitalt: 3 + M32\_2019.zip

## Forord

Denne bacheloroppgaven er et prosjekt ved Institutt for Maskin- og Marinfag (IMM) ved Høgskulen på Vestlandet (HVL) våren 2019. Oppgaven er skrevet av Thomas M. Lloyd og Emil M. M. Larsson. Prosjektet er gjennomført i samarbeid med Salt Ship Design AS med Andreas Stangeland Haavik som ekstern veileder. Intern veileder ved IMM har vært Mons Monstad.

Høsten 2018 tok vi kontakt med Salt Ship Design angående mulige problemstillinger til bacheloroppgave, der Emil M. M. Larsson hadde sommerjobb. Etter samtaler med Salt Ship Design og studiekoordinator for Marinteknikk, Gloria Stenfelt, ble den aktuelle problemstillingen konkretisert. Prosjektet omhandler testing og motstandsberging av appendiksmotstand ved MarinLab.

Det å skrive bachelor oppgave har både vært krevende og lærerik. Vi har fått brukt for mange av fagene vi har hatt tidligere og det har vært spennende å bruke den teoretiske kunnskapen vi har opparbeidet oss og se den i praksis. Det er spesielt kjekt og motiverende når en har fri tilgang på slepetanken ved HVL og alt utstyr en måtte trenge. Noen aspekter ved bacheloroppgaven har vært tyngre enn andre, men med god hjelp fra flere, har vi kommet oss gjennom det hele med en god opplevelse.

### Takk til:

Det er ønskelig å rette en stor takk til de som har hjulpet oss underveis i prosjektet:

**Mons Monstad**, *Intern veileder ved IMM*, for veiledning under prosjektet.

**Andreas Stangeland Haavik**, *Ekstern veileder ved Salt*, for god hjelp underveis.

**Bernt Hustad Hembre**, *Avdelingsingeniør ved HVL*, for assistanse under slepeprøver og nyttige tips.

**Gloria Stenfelt**, *Førsteamanuensis*, for konkretisering av problemstilling og hjelp under skriveprosessen.

**Kjetil Gravelseter**, *Forskningstekniker*, for tilvirkning av slingrekjøler.

**Hans Sande**, *Student ved Marinteknikk HVL*, for god praktisk hjelp underveis i prosjektet.



## Sammendrag

Appendikser er tilleggsutstyr som festes utenpå skroget. Eksempler på dette er slingrekjøler, tunnelåpninger for thrustere, ror, propellaksling, stigeonstruksjoner og boks for sonarer. Det er ikke vanlig å teste skipsmodeller med appendikser, også kallet appended hull, ved MarinLab på Høgskulen på Vestlandet (HVL). Dette er det flere grunner til, men i hovedsak skyldes det kompleksiteten av skaleringsforholdet. Salt Ship Design i samarbeid med MarinLab, ønsker å finne ut hvordan denne motstandskomponenten kan testes og beregnes ved HVL. Appendiksene som blir testet i denne rapporten, er slingrekjøler og tunnelåpninger i baug og akter. For å validere resultatene, samt å se hvor mye motstanden endres med størrelse og plassering, testes det fire ulike slingrekjøler med varierende bredde/lengde og tre forskjellige diametere på tunnelåpningene. Siden appendiksmotstand varierer mye som følger av plassering i henhold til strømmingen, blir det gjennomført en strømningsvisualiseringstest.

Det er mange utfordringer og usikkerheter knyttet til skalering av appendiksmotstand. Grensesjiktet rundt skipet og modellen har forskjellig tykkelse. Skipet og appendiksene opererer med ulike Reynoldstall, slik at det er stor fare for laminærstrømning over appendiksene. Med dette som bakgrunn, skal appendiksmotstanden skaleres separat fra skipets motstand. De ulike testfasilitetene benytter ofte beregningsmetoder som baseres på mange slepeforsøk med ulike skalaer, og ut ifra denne dataen dannes en erfaringsbasert fremgangsmåte.

For å finne appendiksmotstanden, blir det gjennomført slepetester, både med og uten appendikser festet til modellskroget. Med dataene man får ut fra slepeprøver, kan det benyttes flere ulike beregningsmetoder for å anslå denne motstandskomponenten. I denne rapporten blir det testet metoder gitt av ITTC-57, ITTC-78, Appendage drag prediction (ITTC-78) og Holtrop og Mennens power predictions metode. På grunnlag av resultatene fra de ulike metodene, blir det foreslått en prosedyre for videre testing ved MarinLab.

Etter analysering av resultatene fra de ulike metodene, kan man tydelig se at appendiksmotstanden øker som funksjon av våt overfalte og den største slingrekjølen gir den høyeste motstandsøkningen. Appendage drag prediction metode (ITTC-78) gir ikke et realistisk resultat og gir en veldig lav prosentvis økning. De resterende beregningsmetodene gir fornuftige resultater, men det kan ikke konkluderes med hvilken som er mest nøyaktig. ITTC-78 gir høyest motstandsøkning og ITTC- 57 gir lavest. Avslutningsvis blir det konkludert med å ikke teste appended hull ved MarinLab og heller kompensere for appendiksmotstand ved å benytte Holtrop og Mennens metode.





## Abstract

To test ship models with appendages, bilge keel, rudder, etc, also called appended hull, is not the most common thesis at Marinlab at Western Norway University of Applied Sciences (HVL). There are several reasons for this, but mainly the complexity of the scaling. Salt Ship Design in collaboration with MarinLab want to test how this resistance component can be tested and calculated at HVL. The appendage tested in this report is 4 different bilge keels and 3 tunnel thrusters, bow and stern with different length, width and diameter. Since the appended resistance varies depended on the flow, a flow visualization is conducted.

There are many challenges and uncertainties related to the scaling of appended resistance. The boundary layer around the ship and model have different thickness. The ship and the model operate with different Reynolds number, which can lead to laminar flow over the appendages. With this as a prerequisite, must the appended resistance be scaled separately from the ship resistance. Different test facilities often use calculation methods which is based on many ship model tests in different scales. Based on the data from the ship model tests, an experience-based approach can be made.

To be able to calculate the appended resistance, several ship model tests in the tow tank is conducted. These both with and without the appendages attached to the ship model. With the data from the tests, several different calculation methods can be used to compute this resistance component. In this report, ITTC-57, ITTC-78, Appendage drag prediction (ITTC-78) and Holtrop and Mannen power predictions method will be used. Based on the results from the different methods, a procedure for further testing of the appended resistance at MarinLab is presented.

The results show a clear connection between the appended resistance and the wet surface, as the resistance increases as a function of the wet surface. The largest bilge keel results in the highest value for the depended resistance. Appendage drag prediction method (ITTC-78) do not give a realistic result and a low percentage increase. The remaining calculation methods gives reasonable results, but which one is most accurate is not evaluated. ITTC-78 gives the highest increase in resistance, but ITTC-57 the lowest. From the results, it was concluded to not test appended hull with MarinLab and rather compensate for appended resistance by using Holtrop and Mennens method.



## Innhold

Forord .....	3
Sammendrag .....	5
Abstract.....	7
Nomenklatur .....	11
1. Innledning .....	13
2. Metode .....	14
2.1 Testobjekt .....	15
2.1.1 Presentasjon av modell .....	15
2.1.2 Appendikser.....	15
2.2 Motstandskomponenter.....	16
2.2.1 Friksjonsmotstand.....	17
2.2.2 Bølgemotstand .....	18
2.2.3 Appendiksmotstand .....	18
2.3 Strømningstest .....	19
2.4 Teoretisk fremgangsmåte.....	19
2.4.1 Sleping stille vann.....	19
2.4.2 Appendiksmotstand .....	23
2.5 Eksperimentell metode .....	25
2.5.1 Gjennomføring strømningvisualiseringstest.....	25
2.5.2 Utforming og bygging av appendiks .....	27
2.5.3 Oppsett for slepeforsøk.....	28
2.5.4 Gjennomføring av slepeforsøk .....	29
2.6 Feilkilder.....	30
3. Resultat .....	32
4. Diskusjon .....	40
5. Konklusjon.....	41
Referanser .....	42
Liste over Figurer .....	43
Liste over Tabeller.....	43
Vedlegg.....	44



## Nomenklatur

$\beta$	= Appendiks skala effekt faktor
$C_{App}$	= Appendiksmotstandskoeffisient
$F_n$	= Froudes tall
$V$	= Hastighet [m/s]
$L$	= Lengde i vannlinjen [m]
$g$	= Tyngdeakselerasjon [m/s <sup>2</sup> ]
$\lambda$	= Skalaforhold
$\rho$	= Tetthet [kg/m <sup>3</sup> ]
$C_F$	= Friksjonskoeffisient ved ITTC-57
$R_n$	= Reynolds tall
$\nu$	= Kinematisk viskositet [m <sup>2</sup> /s]
$C_T$	= Totalmotstandskoeffisient
$R_T$	= Totalmotstand [N]
$S$	= Våt overflate [m <sup>2</sup> ]
$C_R$	= Restmotstandskoeffisient
$C_W$	= Bølgemotstandskoeffisient
$C_V$	= Viskøstrykkmotstandskoeffisient
$r$	= Formfaktor
$C_{F0}$	= Todimensjonal friksjonskoeffisient
$C_A$	= Korrelasjonskoeffisient
$k_b$	= Skipsbunnen i ruhet [ $\mu\text{m}$ ]
$S_{BK}$	= Våt overflate av slingrekjøel [m <sup>2</sup> ]
$R_{App}$	= Appendiksmotstand
$C_{AA}$	= Lufmotstandskoeffisient ITTC-78
$A_{Vs}$	= Prosjektert areal over vannlinjen til transversplanet
$\Delta C_F$	= Ruhetskorrelasjonsfaktor ITTC-78
$w_i$	= Wakefraction
$k_i$	= Formfaktor for Appendiks (ITTC-78 drag prediction)
$(1+k_2)$	= Formfaktor ved Holtrop og Mennens metode
$C_{BT0}$	= Konstant for tunnelåpninger
$d_T$	= Diameter tunnelåpning
$R_{BT}$	= Motstand indusert av baugthruster
$R_{T, \text{Naked}}$	= Naked hull motstand [N]
$R_{T, \text{app}}$	= Appended hull [N]



## 1. Innledning

Når et skip designes er det flere aspekter en må ta hensyn til, der bruksområdet er den avgjørende designsfaktoren. Om det skal være hurtiggående, ha stor lastekapasitet eller operere i krevende miljøer har alle sine respektive designparametere. Felles for de alle er at det er ønskelig med så lav motstand som mulig, da det fører til hurtigere fartøy og mindre miljøfarlige utslipp. For å kartlegge motstanden til et skip, blir det bygget en modell som blir testet ved slepeprøver. Det blir utført to ulike tester, der den ene er "*naked hull*", som betyr at en tester bare skroget og ingenting annet. Den andre er "*appended hull*" som vil si at alle appendikser på skroget også blir betraktet. Dette kan være tunnelåpninger for thrustere, slingrekjøler, rorbraketter, stige konstruksjoner o.l. Motstanden fra disse appendiksene kalles *appendiksmotstand*. Det er denne motstandskomponenten som blir nærmere undersøkt i denne rapporten. Påvirkningen fra appendikser på et skip er flere. Friksjonsmotstanden økes grunnet økt våt overflate. Strømningen rundt skroget blir påvirket, som kan føre til at avløsning og virvling, som igjen kan føre til økt motstand. Plasseringen av appendikser er svært viktig og det gjennomføres derfor en strømningsvisualiseringstest, for å vurdere plassering i henhold til strømning

Salt Ship Design ønsker å undersøke om det er mulig å teste og måle appendiksmotstanden ved MarinLab på HVL. Den aktuelle problemstillingen oppstod etter samtale med bedrift og studiekoordinator Gloria Stenfelt. Det er ikke vanlig å teste modeller med appendikser ved MarinLab. Det er flere utfordringer knyttet til slike forsøk. Da det er begrensninger ved utstyret på HVL, blir modellene nokså små. Dette gjør følgelig appendiksene veldig små. Vil en da kunne måle en utslagsgivende forskjell når en tester naked hull og appended hull? Det er også knyttet stor usikkerhet til skaleringen av appendiksmotstand. Skipet og de ulike appendiksene opererer med ulike Reynoldstall, som fører til ulik skalering av motstanden. Det blir testet ulike beregningsmetoder, for å prøve og finne den mest gunstige metoden og eventuelt foreslå en prosedyre for beregning av appendiksmotstand ved HVL. Det blir også sett nærmere på hvor mye appendiksmotstanden, henholdsvis for slingrekjøler og tunnelåpninger, utgjør for et skip og hvordan denne endres med størrelser og plasseringer.

En annen som har studert påvirkningen av appendikser er Shiju John. Han utfører en motstandstest for et krigsskip med ulike appendikser som er typisk brukt i marinen. Der sammenligner han hver appendiks for seg selv og ser at disse gir en prosentvis økning i motstand. Slingrekjølen som er en av appendiksene han testet gav en motstandsøkning på 2-3% [1]. Når det kommer til tunnel-thrustere, observerte Jang, Lee, Joo, Kim og Chun at når tunnel-thrustere er tilstede, økte motstanden med 10%. De fant ut at CPP (propell-type) og gitteret foran tunnelåpningen begrenser avløsningen og strømvirvlingen rundt tunnelinngangen og dette medførte en reduksjon i motstanden med 8-9%. Utformingen og plasseringen av krumningsvinkel ved tunnel-inngangen spiller en stor og viktig rolle. I deres slepeforsøk brydde dem seg ikke med plassering og dette gav en stor økning motstanden [2].



Figur 1, Slepetest ved MarinLab HVL

## 2. Metode

Når en skal analysere en problemstilling er det flere metoder som benyttes. Alle med sine fordeler og hensikter. Innenfor skipsdesign og hydrodynamikk er de vanligste metodene teoretiske-, eksperimentelle-, numeriske- og empiriske metoder eller en kombinasjon av disse [3].

Innen numeriske metoder blir det brukt en dedikert programvare som ved hjelp av datamaskinens ytelse, beregner mange og store kompliserte uttrykk med grunnleggende teorier innen hydrodynamikken. Dette kan bygges på stripe-teori, kilde-sluk teori eller panelmodellen. Ulempen ved en slik analyse i dette tilfellet, er at beregningene bare tar for seg den delen av skroget som er under vannlinjen og ser ikke på skipets geometri over vannlinjen. Det er også behov for stor regnekraft. Dersom en ikke har tilstrekkelig ytelse, vil beregningene være svært tidskrevende.

For denne problemstillingen er det flere mulige metoder som kan benyttes. Det hadde vært mulig med en numerisk analyse, som CFD analyse, men grunnet begrenset regnekraft og tidskrevende prosess blir dette utelatt. Det er valgt å fokusere på en eksperimentell metode, herunder modellforsøk ved sleping i stille vann. Måledataene som blir hentet ut, er i hovedsak kvantitative, men det er også gjort kvalitative analyseringer i form av videopptak og bilder. Videre blir teoretiske utregninger gjort for å beregne motstanden som et skip opplever. Det er også presentert empiriske formler for å kunne anslå appendiksmotstanden til et skip.

I de neste underkapitlene blir modellen, appendikser, motstandskomponenter, strømningsstest, oppsett og gjennomføring av den eksperimentelle metoden, samt teorien knyttet til modellforsøkene og resultatene presentert. Feilkilder kommer til slutt, der resultatene vil bli diskutert i henhold til feilkildene under slik testing.



## 2.1 Testobjekt

### 2.1.1 Presentasjon av modell

Modellen som blir brukt i dette forsøket, er brukt i et tidligere hovedprosjekt. Modellen ble bygget våren 2018 av den respektive gruppen. Da begge hovedprosjektene har samme oppdragsgiver, blir denne brukt til videre testing. Skipet er en ringnotsnuper/tråler og dens hoveddimensjoner som modellen baseres på er gitt i Tabell 1. De resterende hoveddimensjonene og skaleringen til modell kan sees i Vedlegg 1.

<b>Lengde i vannlinje [m]</b>	85,24
<b>Bredde midtskips [m]</b>	17,8
<b>Dybde midtskips [m]</b>	13,35
<b>Deplasement [t]</b>	5994
<b>Våt overflate [m<sup>2</sup>]</b>	1968,7

Tabell 1, Hoveddimensjoner for skipet

Da bedriften ønsket at modellen skulle være størst mulig, ble modellens størrelse satt ut ifra maks kapasiteten til CNC fresen ved Høgskulen på Vestlandet. Med dette som utgangspunkt ble modellen bygget med et skalaforhold på 1:47,62.



Figur 2, Modellen

### 2.1.2 Appendikser

Da dette hovedprosjektet omhandler motstand som følger av appendikser, blir modellen bygget på henholdsvis slingrekjøler og tunnel thrustere. Begge med sine respektive hensikter.

Det er flere måter en kan redusere rullebevegelsen til et skip på. Det finnes både aktive og passive stabiliseringssystemer. En av de vanligste og simpleste metodene for å redusere dette er ved å montere slingrekjøler på skroget, noe som de fleste skip i dag er utstyrt med. Dette er langsgående perpendikulære plater som er sveiset til hver side av skroget. Enten som en enkelt plate eller med en simpel form. De strekker seg vanligvis over mellom halve til to tredjedeler av skipets lengde. For å få best virkning av slingrekjølene bør de plasseres på den bredeste delen av skipet og helst der kurvaturen er brattest, med andre ord der hvor strømningshastigheten er størst [4]. For at slingrekjølene skal ha noen virkning, er det nødvendig at bredden er så stor at de stikker utenfor grensesjiktet rundt skroget [4]. Er bredden for stor, vil det være fare for at den ødelegges ved berøring av kai eller kollisjon med flytende gjenstander. En typisk verdi for bredde er 3-5% av skipets bredde [4]. Ved rullebevegelser forårsaker slingrekjølene vann til å bevege seg med skipet, samt danne turbulens som demper bevegelsen og fører til en økning i periode og reduksjon i amplituden [5]. Selv om slingrekjølene er relativt små, skaper de et stort moment som virker mot skipets bevegelse og de kan dempe opp til 1/3 av rulleamplituden [5]. Etter samtale med

oppdragsgiver blir følgende størrelser og plasseringer benyttet. De skalerte verdiene kan finnes i Vedlegg 1.

<b>Slingrekjøl (skip)</b>				
	<b>Alternativ 1</b>	<b>Alternativ 2</b>	<b>Alternativ 3</b>	<b>Alternativ 4</b>
Bredde [m]	0,5	1	1	0,5
x posisjon aktre ende	26	26	31	31
x posisjon fremre ende	52	52	44	44
Våt overflate	13	26	13	6,5
z posisjon midt på slingrekjøl	1,1	1,1	1,1	1,1

Tabell 2, Størrelser og plassering av slingrekjøler

Tunnelthrusterne er et manøvreringsutstyr som blir brukt på flere typer fartøy. De plasseres i baug, hekk eller begge deler, som i dette tilfellet. Da noen fartøyer ofte må manøvrere i lave hastigheter eller innen begrensede områder er dette et svært nyttig med flere manøvreringssystemer. Det blir laget en tunnel i skroget, der det blir plassert en propell. Denne kan drives fra hovedmotoren, eller ha eget fremdriftssystem. Under marine operasjoner blir vann tvunget gjennom tunnelen, som gir en skyvekraft slik at skipet kan bevege seg enten mot styrbord eller babord [6]. Etter samtale med bedrift, blir følgende tunnel diametere og plassering foreslått. De skalerte verdiene kan finnes i Vedlegg 1.

<b>Tunnel thruster forward (skip)</b>			
<b>Diameter [m]</b>	<b>1,25</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>x</b>	68,4	68,4	68,4
<b>y</b>	0	0,00	0,00
<b>z</b>	2,4	2,4	2,4

Tabell 4, Tunnel diameter og plassering baug

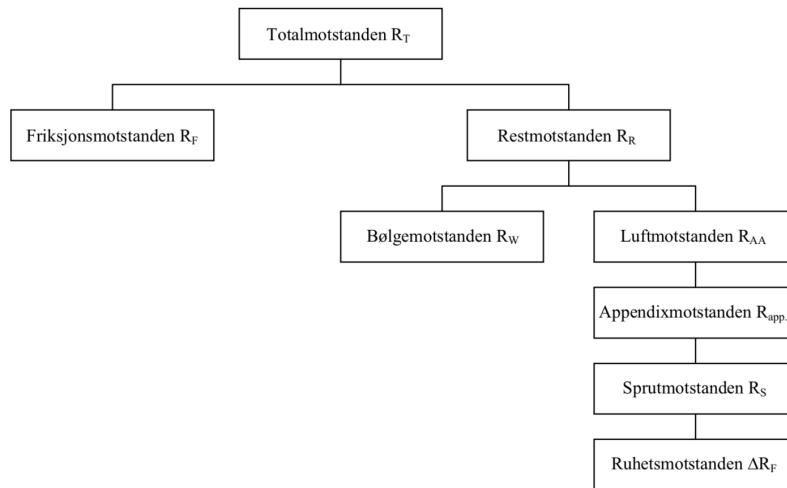
<b>Tunnel thruster aft (skip)</b>			
<b>Diameter [m]</b>	<b>1,25</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>x</b>	8,1	8,1	8,1
<b>y</b>	0,0	0,0	0,0
<b>z</b>	1,2	1,2	1,2

Tabell 3, Tunnel diameter og plassering hekk

Grunnet begrensningene for størrelse av modell ved fresingen, blir det gjort noen forenklinger på tunnel thrusterne. Det blir ikke laget noen avrunding mellom tunnelen og skroget, da dette vil bli en svært liten avrunding. Det er heller ikke plassert noe gitter i åpningene, slik som det ofte er.

## 2.2 Motstandskomponenter

Motstanden som et skip opplever består av mange kilder, også kallet motstandskomponenter. Alle komponentene bidrar på hver sin måte og blir addert opp til å utgjøre skipets totalmotstand. Ved beregning av motstand benyttes dimensjonsløse koeffisienter for de ulike motstandskomponentene, dette gjør det enklere å holde oversikten, samt at regnearbeidet forenkles [7]. Figur 3 viser en overordnet oversikt over de ulike motstandskomponentene gitt som krefter [N] som eksisterer på et skip [7].



Figur 3, Inndeling av motstandskomponenter [8]

### 2.2.1 Friksjonsmotstand

Friksjonsmotstanden avhenger av skipets hastighet og er en betydelig motstandskomponent siden et skip har en stor våt overflate  $S$  [ $m^2$ ]. Vannpartiklene som befinner seg inntil skroget vil feste seg til skrogoverflaten som gjør at de ikke får noen relativ hastighet til skipet. Det er dette som kalles «non-slip» grensebetingelse og gir vannet nær skroget en hastighetsprofil som fører til at vannpartiklenes hastighet vil variere med avstanden fra skroget. Dette danner en skjærkraft langs skroget og det er denne kraften som kalles en friksjonsmotstand. Men utregningen på et skip med utgangspunkt fra fluidmekanikkens lover er nesten umulig. Derfor har det blitt utviklet forskjellige empiriske formler som gir en tilnærmet beregning av friksjonsmotstanden.

Visst det ikke hadde vært noen friksjon så hadde vannet beholdt hele sin strømningsenergi etter å ha passert skipet. Siden friksjon er faktisk tilstede vil vannet miste sin bevegelsesenergi og vannet som er i grensesjiktet klarer ikke å følge med vannet i den fri strøm [3]. Fra Bernoulli's ligning, får man at når hastigheten i vannet øker, synker trykket [3]. Vannhastigheten øker for å komme rundt skroget og ved enden av skroget må vannhastigheten reduseres for å komme på lik linje med omgivelseshastigheten. For å få dette til må trykket stige før det reduseres til omgivelsestrykket etter at legeme har passert. Visst trykkstigningen over akterskip er like stort som over forskipet blir det ingen trykktap som medfører at det ikke blir noen trykk-motstand. Siden friksjon spiller en rolle, taper vannet hastighetsenergi og klarer ikke å gjenopprette lik trykktopp som ved forskipet. Dette gjør at det blir et stort overskudd i forskipet siden trykk-oppbyggingen foregår etter at skipet er passert. Det er dette som kalles viskøs trykk-motstand [3].

Ser en på utviklingen av grensesjiktet så ser man at ved en krum overflate må vannstrømmen endre retning samtidig som hastigheten skal omsettes til trykk. Siden friksjonen har sørget for tap av energi vil ikke det lengre være stor nok hastighet til å opprette et stort nok trykk til å holde vannet langs skipet, får da en avløsning. Dette gjør at det kan oppstå negativ hastighet i nærområdet og kraftig turbulens, som fører til økt motstand. Spiller avløsningen og hvirveldannelsen en stor rolle vil den økte motstanden kalles for «drag». Er avløsningen og hvirveldannelsen moderat, inkluderes det som kalles form-motstand og den blir representert ved en form-faktor [3]. Formfaktor er økning i friksjonsmotstanden som kommer av skrogets fortrengningseffekt [8].

### 2.2.2 Bølgemotstand

Når et skip beveger seg i vannoverflaten, vil skipet gi fra seg energi i form av bølger. Derav navnet bølgemotstand. Skipet vil virke som en «bølgegenerator» der motstanden øker betraktelig da skipet fortrenger vannet på sin ferd fremover. Bølgemotstand er i høyeste grad avhengig av hastighet og ved lave hastigheter vil bølgemotstanden være ubetydelig, da det ikke genereres noe form for bølger. Bølgemotstanden er en betydelig del av totalmotstanden og det er flere måter for å redusere denne. Kanskje den mest effektive er ved bruk av bulb i forskipet. Plasseres denne riktig vil den skape sitt eget bølgesystem som delvis går i motfase til skipets bølgesystem [7]. Det er vanlig at bølgemotstanden blir lagt inn i en «samlepost» som kalles restmotstand, som også omfatter flere tillegg som sprutmotstand, luftmotstand og appendiksmotstand, der bølgemotstand er klart størst [7].

### 2.2.3 Appendiksmotstand

I denne oppgaven fokuseres det på appendiksmotstanden. Dette er motstanden som oppstår på grunn av slingrekjøler, rorbraketter, akslinger, tunnelåpninger til tunnel thrustere etc. Slikt utstyr er ofte nødvendig, men har en negativ innvirkning på motstanden. For eksempel kan en slingre kjøle på et enskrue skip føre til en økning i motstand på 2-3 % [9]. Motstandsøkning som følge av tunnelåpninger er svært avhengig av plassering og krumningsvinkel mellom skrog og tunnelinngang. Om det ikke tas hensyn til plassering eller krumningsvinkel, kan motstanden øke så mye som opp mot 10%. Om dette tas hensyn til, motstanden deretter synke rundt 8% [2]. Det er flere måter disse tilleggsutstyrene kan påvirke motstanden. Ved rett og nøye planlagt plassering av disse tilleggene i henhold til strømmingen, vil motstandsøkningen i hovedsak være grunnet økning i våt overflate som igjen fører til økt friksjonsmotstand. Ved en dårlig plassering eller om appendiksene ikke er godt nok designet, vil de påvirke strømmingen som kan føre til avløsning og hvirvling som også kan påvirke motstanden. Er appendiksene plassert for nære overflaten kan de også forårsake bølgemotstand [9]. Er for eksempel slingrekjølene plassert slik at strømmingen krysser appendikset, øker motstanden mer enn om plasseringen er nøye planlagt [4]. Det er ikke bare motstanden som blir påvirket av Appendiks, men en kan oppleve endring i responsen til skipet, samt vibrasjoner og lyder [1]. Det er derfor svært viktig med rett plassering og design av appendiks for å minimere de ugunstige endringene.

For å estimere hvor mye påvirkning appendiksene bidrar til totalt motstanden, er det fire alternative metoder som er vanlig å bruke:

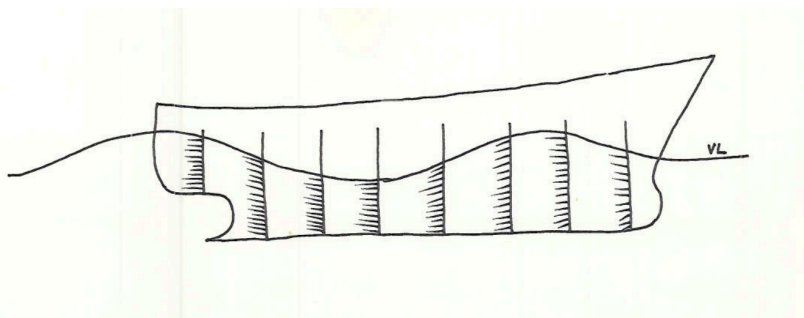
- 1) Teste modell med og uten appendiksene. Differansen i modell  $C_T$  med og uten appendiksene vil representere motstandsbidraget, som vil videre skaleres til fullskala. Det er denne metoden denne oppgaven vil ta for seg.
- 2) En kan også bruke formfaktor metoden. Denne er lik som alternativ (1), men man bruker en formfaktor  $C_{App s} = (1+\beta)*C_{App m}$  for å skalere motstanden, der  $\beta$  er utledet av flere CDF-analyser av modeller i ulike skalaer. De ulike institusjonene har egne erfaringsbaserte verdier for  $\beta$ . Typiske verdier er 0,5-1, avhengig av hvilke appendiks som testes. Ofte 1 for slingrekjøler og for appendikser med store lengder.
- 3) Teste ulike separate modeller av appendiksene i ulike hastigheter. Med store modeller av appendiksene i høge hastigheter, i f.eks en tank, med turbulent strømming, altså høyere Reynoldstall, vil en da oppnå en tilnærmet verdi for fullskala. Denne teknikken er typisk brukt for ror.
- 4) Bruke empirisk data og ligninger utledet fra tidligere modell forsøk [9].

Når man gjør modellforsøk uten noen former for appendikser, kalles dette for *naked hull testing*. Dette indikeres med *naked* i indeksen, som slik  $R_{T,s Naked}$ . Under modelltesting kalles et skrog med appendikser for *appended hull* og totalmotstanden til skipet benevnes som  $R_{T,s app}$  for å markere dette.

## 2.3 Strømningstest

Da plasseringen av appendiksene er svært viktig, både for den ønskede effekten av hvert appendiks samt minimere motstandsøkning og forstyrrelser i strømmingen, er det vanlig å ta en strømningstest. Dette blir gjort for å kartlegge hvordan strømningsretningen endres langs skroget. Ut ifra denne informasjonen er det mulig å plassere appendiksene på den mest gunstige lokasjonen. Det som er problematisk med plasseringer av appendiks, er at strømmingen rundt skroget endrer seg med hastighet. Derfor er det nødvendig å bestemme hvilken hastighet det er viktigst å redusere motstandsøkningen for [4]. Normalt er dette operasjonshastigheten til skipet.

En slik test blir utført ved å male tynne vertikale striper langs modellskroget, før modellen blir slept med korresponderende hastighet. Da blir malingen strekt ut i strømningsretningen for den aktuelle seksjonen, som vist i Figur 4.



Figur 4, Strømningsvisualisering

For å minimere motstandsøkningen som følger av slingrekjøler, plassere slingrekjølene på den delen av skipet hvor strømningshastigheten er størst, samtidig er det ønskelig at strømmingen ikke krysser slingrekjølen på tvers. I Figur 4 er det en illustrasjon av en strømningsvisualisering og som en kan se fra dette, er det utfordrerne å plassere slingrekjølene etter de optimale kriteriene.

## 2.4 Teoretisk fremgangsmåte

### 2.4.1 Sleping stille vann

#### 2.4.1.1 ITTC 57

For å gjennomføre slike modellforsøk må det stilles noen krav for at forsøket skal være representativ. En av kravene er dynamisk likhet, det vil si at forholdet mellom de forskjellige kreftene skal være lik. I hydrodynamisk sammenheng er Froude tallet svært nyttig, da det kan brukes til å studere sammenhengen mellom geometrisk like legemer med ulik størrelse, som modell og skip. Om Froude tallet er lik mellom modell og skip, vil de få lik bølgekoeffisient og et bølgesystem med samme utseende. Det betyr at forholdet mellom tyngdekraftene og treghetskreftene på skroget er likt mellom modell og skip [7]. Froudes tall er gitt ved:

$$F_n = \frac{V}{\sqrt{gL}}$$

Formel 1, Froude tall

der  $V$  er hastighet til modell eller skip,  $g$  er tyngdeakselerasjon og  $L$  er karakteristisk lengde.

For å oppfylle Froudes krav, må modell slepes ved korresponderende hastighet.

$$V_m = V_s * \sqrt{\frac{L_m}{L_s}}$$

Formel 2, Korresponderende hastighet

Dette får man ved å sette Froude tallet for modell og skip lik hverandre, deretter løser en hastighet til modellen  $V_m$ . Deretter definerer man skala forholdet, ved følgende ligning:

$$\frac{L_s}{L_m} = \lambda$$

Formel 3, Skala

En kan også oppnå geometrisk likedannet ved å si at tyngdeakselerasjon er den samme, og deretter løse hastigheten til modellen  $V_m$  ved å bruke skala faktoren direkte.

$$V_m = \frac{V_s}{\sqrt{\lambda}}$$

Formel 4, Modellhastighet beregnet med skala

Som nevnt tidligere, er det ønskelig og oppnå mest mulig lik dynamiske og geometriske egenskaper mellom modell og skip. Når en bruke Froudes skaleringslover for å skalere til modell eller omvendt, brukes ulike skaleringsfaktorer for forskjellige fysiske parametere. Disse parametere kan brukes til å nedskalere størrelser (masse, volum, areal, etc). I likhet med skaleringsfaktoren, er forholdet mellom tetthet til skip og modell en viktig faktor i utregninger. For modellen brukes  $\rho_m$  som representerer tetthet til væsken der modellen slepes i, og  $\rho_s$  representerer tetthet til væsken i fullskala. Som oftest vil  $\rho_m$  være ferskvann og  $\rho_s$  være saltvann [10].

Det siste kravet for at modellforsøkene skal være representativt, er kinematisk likhet. Det vil si at strømmingen rundt modellen må være tilsvarende som rundt skipet. I de fleste tilfeller vil det lett oppstå laminær strømmingen rundt små, glatte, langsomtgående modeller, men for et skip vil det omtrent alltid turbulent strømming. For å rette opp på denne «feilen», er det vanlig å benytte turbulens-stimulering. Denne turbulensstimulatoren blir som oftest plassert ved baugen og skal introdusere litt ekstra motstand. Da vil overgangen fra laminær strømmingen til turbulent strømmings samsvare bedre med skipets, og et mer riktig strømningsbilde blir oppnådd, spesielt ved lave hastigheter [3].

Siden likheten av strømningsbildet for modell og skip ikke blir helt likt, blir det korrigert ved hjelp av ITTC 57 linjen. Etter å ha gjennomført sleping i stille vann med modellen, er det flere måter en kan regne ut totalmotstanden for et skip. Blant annet er det ITTC-57 metoden, også kallet Froudes forbedret metode, eller Prohaskas metode [3].

Ved bruk av Froudes forbedret metode blir skipets motstand delt inn i to hovedkomponenter, friksjonsmotstand og restmotstand. Rekommandert praksis og retningslinjer er gitt av ITTC [11]. Da kan friksjonskoeffisienten for modellen ved ITTC-57 formelen:

$$C_{F,m} = \frac{0.075}{(\log(R_{N,m}) - 2)^2}$$

Formel 5, Friksjonskoeffisient ITTC-57

Der  $R_N$  er det som kalles Reynolds tall. Dette er gitt som:

$$R_N = \frac{V * L}{\nu}$$

Formel 6, Reynoldstall

Der  $\nu$  er kinematisk viskositet. Når man sleper modellen ved korresponderende hastighet, måler man totalmotstanden som virker på modellen,  $R_{T,m}$ . Denne gjøres dimensjonsløs ved formelen:

$$C_{T,m} = \frac{R_{T,m}}{\frac{1}{2} * \rho_m * S_m * V_m^2}$$

Formel 7, Totalmotstand modell

Der  $S_m$  er den våte overflaten til modellen. Siden totalmotstanden deles opp i to hovedkomponenter, kan restmotstanden  $C_{R,m}$  beregnes:

$$C_{R,m} = C_{T,m} - C_{F,m}$$

Formel 8, Restmotstand modell for Froudes forbedret metode

Det er under denne kategorien motstandskomponenter som bølgeomotstanden og appendiksmotstanden ligger. Videre gjøres det en antagelse, som tilsier at restmotstanden for modellen, er lik restmotstanden for skipet som et resultat av likhet i Froude tallet:

$$C_{R,m} = C_{R,s}$$

Formel 9, Likhet i restmotstand for modell og skip

Om man videre beregner Reynoldstallet for skipet, kan man da på samme måte som for modellen, beregne friksjonskoeffisienten til skipet. Da ender man opp med en formel som kan løses med hensyn til skipet totalmotstandskoeffisient:

$$C_{T,s} = C_{R,s} + C_{F,s} = C_{T,m} - C_{R,m} + C_{F,s}$$

Formel 10, Totalmotstand for skip ved Froudes forbedret metode

Ved Prohaskas formfaktormetode deles totalmotstanden opp i to hovedkomponenter, bølgeomotstand og viskøstrykkmotstand. Da blir totalmotstandskoeffisienten uttrykket på følgende måte:

$$C_T = C_W + C_V$$

Formel 11, Prohaskas formfaktormetode

Der  $C_W$  og  $C_V$  er henholdsvis, bølgeomotstand- og viskøstrykkmotstands-koeffisient. I denne metoden antar man at bølgeomotstandskoeffisienten ved lave hastigheter (Froude tall mellom 0,05-0,15) kan uttrykkes på følgende måte:

$$C_W = M * F_N^n$$

Formel 12, Bølgeomotstandskoeffisient

Der  $M$  og  $n$  er konstanter som ofte blir satt til henholdsvis 1 og 4. Men det viser seg at for fyldige skip kan potensen til  $F_N$  være opp til 6. Dette justeres for å få en nærmest mulig rett linje av målepunktene i grafen som brukes til å finne formfaktoren  $r$  [3]. Sammenhengen mellom formfaktoren  $r$  og viskøstrykkmotstandskoeffisient  $C_V$ , som tar hensyn til både friksjonskrefter og viskøse krefter, er gitt ved:

$$r = \frac{C_V}{C_{F0}} \rightarrow C_V = r * C_{F0}$$

Formel 13, Formfaktor

Der  $C_{F0}$  er den todimensjonale friksjonskoeffisienten. Indeksen med 0 er brukt for å skille den fra ITTC-linjen.  $C_{F0}$  finnes ved å bruke Reynoldstallet til modellen og er gitt ved følgende formel:

$$C_{F0} = \frac{0,067}{(\text{Log}(R_N) - 2)^2}$$

Formel 14, Den todimensjonale friksjonskoeffisienten

Ved formlene gitt ovenfor kan man da utrykke totalmotstandskoeffisienten til modellen slik:

$$C_{T,m} = M * F_N^n + r * C_{F0,m}$$

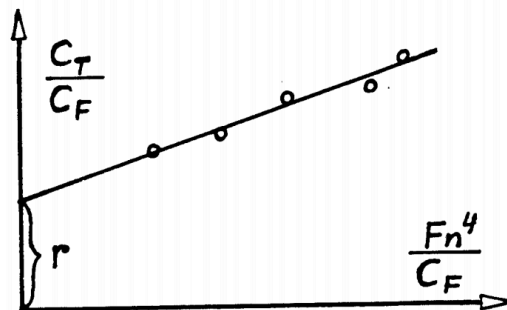
Formel 15, Totalmotstandskoeffisient ved Prohaskas metode

Om man da endrer på *Formel 15* slik at  $r$  står alene som en konstant i en førstegradligning, får man følgende uttrykk

$$\frac{C_{T,m}}{C_{F0,m}} = M * F_N^n + r$$

Formel 16, Sammenheng for å finne formfaktor  $r$  ved Prohaskas metode

Om man setter disse målerverdiene opp mot hverandre i en graf, der  $\frac{C_{T,m}}{C_{F0,m}}$  er på y-aksen og  $M * F_N^n + r$  på x-aksen, vil man få en tilnærmet rett linje. Denne linjen trekker man så over y-aksen og man kan lese av formfaktoren direkte, som vist i Figur 5.



Figur 5, Illustrasjon for hvordan man finner formfaktoren [3] s.41

Når formfaktoren da er funnet kan en deretter finne bølgemotstandskoeffisienten ved de høyere hastighetene, på samme måte som man finner restmotstandskoeffisienten i Froudes forbedret metode:

$$C_{W,m} = C_{T,m} - r * C_{F0,m}$$

Formel 17, Bølgemotstandskoeffisient for modell med Prohaskas metode

Og på samme måte som Froudes forbedret metode, antar man at bølgemotstandskoeffisienten (restmotstanden) for modellen er lik som skipet, som et resultat av likhet i Froude tall. Man setter da:

$$C_{W,m} = C_{W,s}$$

Formel 18, Sammenheng i bølgemotstandskoeffisient for modell og skip



Videre beregnes den viskøse trykkmotstandskoeffisienten til skipet, uttrykket ved formfaktoren  $r$  og den todimensjonale friksjonsmotstandskoeffisienten til skipet:

$$C_{V,s} = r * C_{F0,s}$$

Formel 19, Den viskøse trykkmotstandskoeffisienten til skipet ved Prohaskas metode

Når alle dimensjonsløse motstandskomponenter er funnet, kan man addere opp komponentene og finne totalmotstandskoeffisienten på følgende måte:

$$C_{T,s} = C_W + C_v = C_{T,m} - C_{V,m} + C_{V,s}$$

Formel 20, Totalmotstandskoeffisient for skipet ved Prohaskas metode

For å korrigere for ulike svakheter ved de forskjellige beregningsmetodene, modellforsøksmetodikken, overflatebehandlingen samt at det bare er likhet i Froude tall og ikke Reynoldstall eller Webertall, blir en korrelasjonsfaktor  $C_A$  lagt til totalmotstandskoeffisienten. De forskjellige modelltankene har gjerne utviklet egne erfaringsbaserte verdier. En vanlig verdi å bruke er 0,0004 [3]. Om vi antar at ruheten utgjør det største bidraget, kan man bruke en empirisk formel lansert av ITTC. Denne er basert på en rekke modelltanker og omfatter skipslengder mellom 120 og 134 m. [3]. Denne er gitt ved:

$$C_A = 1,05 * \sqrt[3]{\frac{k_b}{L}} - 0,64$$

Formel 21, ITTC formel for korrelasjonsfaktor

Der  $k_b$  er skipsbunnen ruhet i  $\mu\text{m}$  og  $L$  er skipets lengde i meter. En vanlig verdi for ruhet til nybygg er 125  $\mu\text{m}$  [3]. Ut ifra den dimensjonsløse totalmotstandskoeffisienten, fra både Froudes forbedre metode (ITTC 57) og Prohaskas metode kan en beregne den totale motstanden skipet opplever i N:

$$R_{T,s} = \frac{1}{2} \rho_s V_s^2 S_s C_{T,s}$$

Formel 22, Totalmostand for skipet

Der  $S_s$  er skipets våte overflate,  $\rho_s$  er tettheten til væsken skipet beveger seg i og  $V_s$  er skipets hastighet.

## 2.4.2 Appendiksmotstand

### 2.4.2.1 ITTC-57

For å finne appendiksmotstanden for de ulike appendiksene, blir det gjort som beskrevet i Appendiksmotstand og bruker formlene utledet i seksjon 2.4.1 Slepning stille vann. Deretter sammenlignes totalmotstandskoeffisienten for skipet, med og uten appendikser:

$$C_{App,s} = C_{T,s App} - C_{T,s Naked}$$

Formel 23, Motstandskoeffisient for appendiksmotstand

Denne motstandskoeffisienten blir så brukt til å skalere motstanden modellen opplever til fullskala appendiksmotstand:

$$R_{App,s} = \frac{1}{2} \rho_s V_s S_{App} C_{App,s}$$

Formel 24, Appendiksmotstand

Hvor  $S_{App}$  er den våte overflaten til appendiksene, som i dette tilfellet er slingrekjøler. Dette blir gjort for både slingrekjølene og tunnelåpningene.

### 2.4.2.2 ITTC 78

ITTC har også lansert en nyere prosedyre for beregning av totalmotstanden for skipet, kallet "1978 ITTC Performance Prediction Method". Den tar utgangspunkt fra ITTC 57 metoden, forklart ovenfor. Om skipet er utstyrt med slingrekjøler av betydelig størrelse, som i dette tilfellet, blir totalmotstanden til skipet uttrykket som følger [12]:

$$C_{T,S\ app} = \frac{S_s + S_{BK}}{S_s} [(1 + r)C_{F,S} + \Delta C_F + C_A] + C_R + C_{AAS}$$

Formel 25, Totalmotstandskoeffisient for skipet ved ITTC 78

Hvor  $S_{BK}$  er den våte overflaten til slingrekjølen, formfaktoren  $r$  er funnet ved Prohaskas metode (Formel 16),  $C_{F,S}$  følger ITTC 57 linjen (Formel 5),  $C_R$  er i dette tilfellet gitt som:

$$C_R = C_{T,m} - (1 + r)C_{F,m}$$

Formel 26, Restmotstandskoeffisient ved ITTC 78

$C_{AAS}$  er luftmotstandskoeffisienten til skipet og blir beregnet på følgende måte:

$$C_{AA,S} = \frac{1}{2} \rho_A V_s^2 C_{DA} \frac{A_{Vs}}{S_s}$$

Formel 27, Luftmotstandskoeffisient ved ITTC 78

Da gjenstår  $\Delta C_F$  og  $C_A$ , som i de foregående metodene er slått sammen, men her er de separert og begge representerer hver sin korreksjon.  $\Delta C_F$  er per definisjon en beskrivelse av hvordan ruheten påvirker motstanden og er en korrigering for denne. Denne er gitt ved:

$$\Delta C_F = 0,044 \left[ \left( \frac{k_s}{L_{WL}} \right)^{\frac{1}{3}} - 10 * R_e^{-\frac{1}{3}} \right] + 0,000125$$

Formel 28, Ruhetstillegg ved ITTC 78

Der  $k_s$  er ruheten til skipets skrog og  $L_{WL}$  er lengde i vannlinje. Om en ikke har en verdi for ruheten, kan en sette denne til  $k_s = 150 * 10^{-6}$  [12]. Videre er  $C_A$  en korrelasjonskoeffisient som skal dekke usikkerhet i testingen og effekter som ikke er tatt med i denne metoden. Denne er gitt ved:

$$C_A = (5,68 - 0,6R_e) * 10^{-3}$$

Formel 29, Korrelasjonskoeffisient ITTC 78

Her blir det også gjort som beskrevet over, og en sammenligner totalmotstandskoeffisientene for naked hull og appended hull for å finne den isolerte motstandskoeffisienten for appendiksene, som videre blir brukt til å beregne motstanden ved Formel 24. Denne metoden blir bare benyttet for beregning av motstand som forekommer av slingrekjøler.

### 2.4.1.3 ITTC 78- Beregning av fullskala appendiks drag

I henhold til ITTC 78 er det også mulig å beregne fullskala appendiks drag med bruk av lokale Reynoldstall og en formfaktor [12]. Dette gjør det mulig å anslå appendiksmotstand, uten å gjennomføre modelltest med appended hull. Har man derimot gjort dette, kan dette brukes å bestemme *wake fraction* som inngår i formelen:

$$C_{APP,S} = \sum_{i=1}^n (1 - w_i)^2 (1 + k_i) C_{Fsi} \frac{S_i}{S_s}$$

Formel 30, fullskala Appendiks drag koeffisient ved formfaktor ITTC 78

Der  $w_i$  er wake fraction, som baseres på hvor appendikset er plassert og erfaringsbasert data ved tidligere forsøk.  $k_i$  er formfaktoren til hvert appendiks, denne avhenger av formen på appendikset samt erfaringer

og publisert data. Verdier for formfaktoren kan finnes for generelle fasonger publisert av Hoerner eller Kirkman og kloëtsli [12]. Vanlige verdier for henholdsvis  $w_i$  og  $k_i$  er 0,1 og 1,4. Ved bruk av denne metoden, får man direkte ut verdier for motstanden for hvert enkelt appendiks ved følgende formel:

$$R_{APP,S} = \frac{1}{2} \rho_s V_s^2 C_{APP,S} S_{APP}$$

Formel 31, Appendiksmotstand for skipet

Denne metoden blir bare benyttet for beregning med slingrekjøler, da det ikke er tilstrekkelig informasjon for beregning med tunnelåpninger.

#### 2.4.1.4 Holtrop og Mennens Power Prediction Method

Holtrop og Mennen har lansert en metode der totalmotstanden til skipet blir beregnet med formler som baseres på statistiske data. Metodens nyeste versjon baseres på 334 modelltester og resultater tilhørende de [13]. Her deles totalmotstanden opp på følgende måte:

$$R_T = R_F(1 + k) + R_{APP} + R_W + R_B + R_{TR} + R_A$$

Formel 32, Holtrop og Mennen Power Prediction Method

Da det er appendiksmotstanden  $R_{APP}$  som er interessant for denne oppgaven, er det denne som blir utledet ved Formel 33:

$$R_{APP} = \frac{1}{2} \rho_s V_s^2 C_F (1 + k_2)_{eqv} \sum S_{APP} + R_{BT}$$

Formel 33, Totalmotstand Appendiks ved Holtrop

Hvor  $C_F$  er beregnet som i ITTC 57 og  $(1 + k_2)_{eqv}$  er en formfaktor som beregnes på følgende måte:

$$(1 + k_2)_{eqv} = \frac{\sum (1 + k_2) S_{APP}}{\sum S_{APP}}$$

Formel 34, Formfaktor ved Holtrop

$(1 + k_2)$  er gitt av Holtrop og settes til 1,4 for slingrekjøler [9]. Videre er  $R_{BT}$  et anslag for hvor stor motstand som forekommer som følge av tunnelåpning for baug thrustere. Denne er gitt ved:

$$R_{BT} = \pi \rho V_s^2 d_T C_{BTO}$$

Formel 35, Motstand som følger av tunnelåpning for baug thruster

$d_T$  er diameteren for tunnelåpningen og  $C_{BTO}$  er en konstant som ligger mellom 0.003- 0.012. Om tunnelåpningen er plassert i den sylindriske delen av bulben, blir den satt til 0.003.

Med de ulike beregningsmetodene utledet over, kan man beregne motstanden som forekommer av appendikser og sammenligne disse.

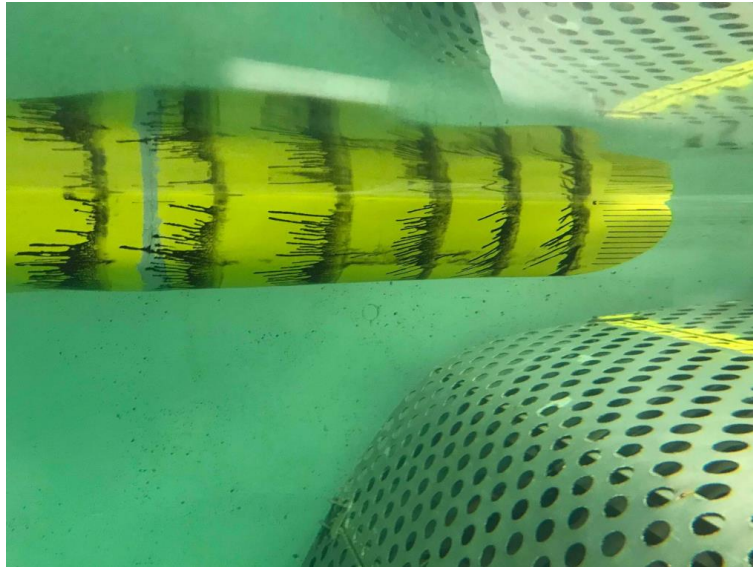
## 2.5 Eksperimentell metode

### 2.5.1 Gjennomføring strømningsvisualiseringstest

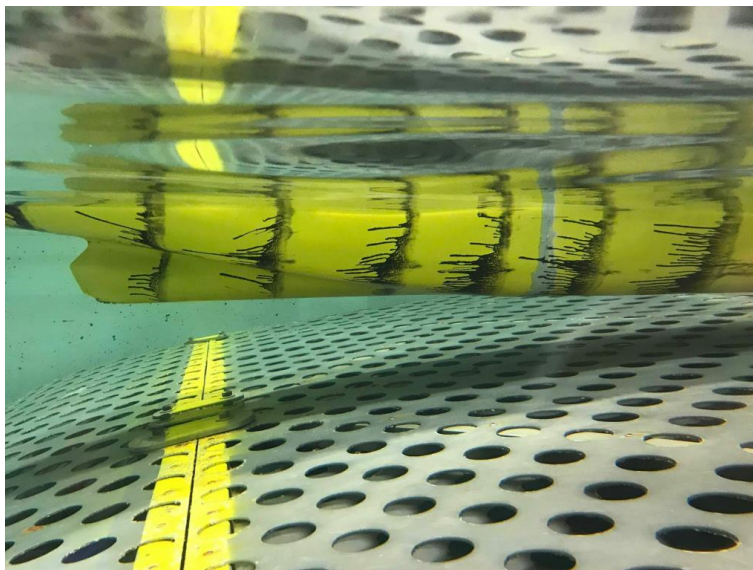
Som beskrevet over i

Strømningstest, er det svært interessant å se på hvordan strømningsretningen endres langs skroget. Det blir derfor gjennomført en strømningstest. Dette gjøres ved å male tynne vertikale striper lang skroget på hver seksjon bakover for å så slepe modellen med korresponderende hastighet. Da strømningsretningen endres med hensyn på hastighet og en kun kan optimalisere appendiksene for en ønsket hastighet, blir det kun testet for en hastighet som tilsvarer 17 knop i fullskala. Det som er problematisk med strømningstester er å få malingen til å spre seg tilstrekkelig mye. Da maling i seg

selv har ganske tykk konsistens, blir det brukt en blanding mellom kokt linolje og oljemaling etter tips fra Stadt Towing Tank. Modells kroget blir også smurt inn i linolje for at malingen skal gli lettere. Ved lave hastigheter må blandingen være veldig tynn, men da oppstår det problemer når modellen plasseres i vannet og blandingen renner av. Blandingens tykkelse må være tykkere ved høyere hastigheter. Det er ikke et gitt blandingsforhold som passer flere hastigheter og man må opparbeide seg erfaring. For at blandingen ikke skal renne av når modellen løftes ut av vannet, blir det tatt bilder under vann.



Figur 6, Resultat strømningstest forskip



Figur 7, Resultat strømningstest akterskip

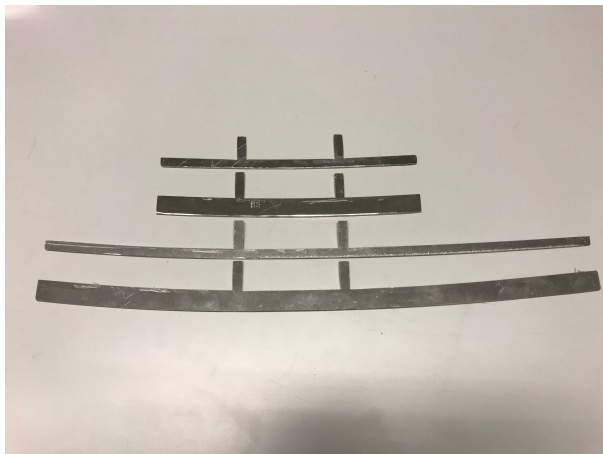
I Figur 6 og Figur 7 er resultatene fra strømningstesten presentert. Her ser en tydelig hvordan strømningsretningen endres bakover hver seksjon. En kan også antyde at strømningshastigheten er størst ved midten av modellen, der den er bredest, da det er her malingen har blitt "dratt lengst". Det er her det er ønskelig å plassere slingrekjølene. Som en kan se fra figurene, endres også strømningsretningen noe her, dette er ikke ønskelig siden motstanden fra slingrekjøler kan øke noe om strømmingen krysser overflaten. Ut ifra denne informasjonen kan slingrekjølene designes og plasseres der det blir induisert minst motstand.

### 2.5.2 Utforming og bygging av appendiks

Som beskrevet i **Feil! Fant ikke referanseilden.**, blir det foreslått størrelse og plassering i x-, y- og z-retning for appendiksene av oppdragsgiver. Skaleringsforholdet 1:47,62 som er brukt for å bygge modellen, blir også brukt for å skalere appendiksene. Det blir brukt en 3D-modell av skroget i Creo Parametric for å finne de rette plasseringene og utformingene av de ulike appendiksene. Dette gir en mulighet til å visualisere designet før en går videre, samt hente ut informasjon om arealer.

Siden slingrekjølene har en relativ enkel form bestående av en enkelt plate som festes til skroget, ble det i samråd med labingeniørene ved Høgskulen på Vestlandet, bestemt å skjære de ut med CNC maskin. For å gjøre dette, trengs det en 2D tegning av det gitte objektet i filformatet DXF 2007. Utfordringen med å lage slingrekjølene blir å få de til å følge skroget på de gitte plasseringene. For å få de til å følge skroget, blir de først tegnet inn på 3D-modellen i Creo. Dette blir gjort ved å legge inn en rekke punkt som indikerer start og slutt punkt, samt å lage et plan med rett vinkel som en skisserer i. Når en da har fått en slingrekjøel som passer og formen stemmer overens med skroget, blir det laget en arbeidstegning av denne [Vedlegg 2]. Videre importeres denne til AutoCad og lagrer filen i rett format. Dette sendes så over til CNC maskinen som skjærer ut de ønskede slingrekjølene. De blir laget i 3 mm tykke aluminiumsplater, da dette materialet er sterkt nok for å motstå eventuelle motstandskrefter under slepeforsøkene, samt at vekten skal avvike minst mulig fra slik ballasteringen ble gjennomført ved sist forsøk.

Siden det skal testes fire ulike slingrekjøler, der to og to skal ha samme lengde, blir det laget to hull med rett vinkel på hver side på skroget som samsvarer med alle fire slingrekjølene. Det blir derfor tegnet inn to tapper på hver slingrekjøel, der alle har samme koordinat, som samsvarer med hullene. Dette gjør jobben med bytting av slingrekjøler enklere.

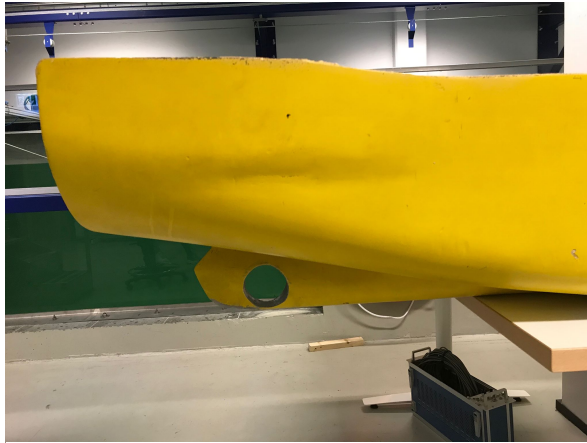


Figur 9, De ulike slingrekjølene

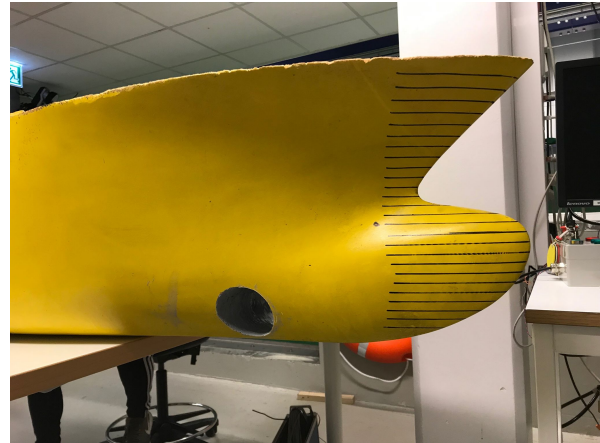


Figur 8, Slingrekjøel alt. 2 montert

På samme måte som for slingrekjølene blir tunnel thrusterne i baug og hekk tegnet inn i 3D-modellen i Creo [Vedlegg 2]. Dette blir gjort for å visualisere plasseringene og for å lettere lokalisere punktene på den faktiske modellen. Ut ifra denne modellen kan en også hente ut endringen i den våte overflaten. Når punktene er funnet og referansepunkt laget, blir plasseringen målt opp og tegnet på modellskroget. Deretter borres det gjennomgående hull i modellen med den gitte diameter, ved hjelp av drill og hullsag. For at modellen ikke skal lekke under slepingen, blir overflaten inni hullene dekket med et tyng lag med fugemasse.



Figur 10, Tunnelåpning alt. 3 hekk



Figur 11, Tunnelåpning alt. 3 baug

### 2.5.3 Oppsett for slepeforsøk

Ved det tidligere forsøket, ble tre ulike forskip benyttet med samme hekk. Skifte av forskipet blir gjort ved å skru sammen baug og hekk med fire bolter. I denne oppgaven blir bare et av forskipene benyttet og etter ønske fra oppdragsgiver blir det byttet forskip.

For å forenkle den visuelle kontrollen, er hver centimeter oppover på forskipet tegnet på. Den ønskede vannlinjen for testdypgangen er indikert med en svart prikk, som vist i Figur 10. Videre finnes slepegirets plassering. Dette er innretning som blir montert fast inni modellen og som festes til en snor, som sleper modellen ved hjelp av enten en motor eller fallvekt. Slepegiret skal plasseres i vannlinjeplanet arealsenter, også kallet flotasjonssenter. Dette ble gjort ved tidligere testing ved hjelp av Creo Parametric. Punktet ble funnet til å være i hekkdelen av modellen, der det blir limt en plate i bunnen, slik at man får festet slepegiret med skruer [14]. Dermed var det bare til å feste slepegiret i den allerede eksisterende platen.

Før modellen blir plassert i vannet, må slingrekjølene festes. Dette blir gjort ved å plassere de designede tappene i hullene boret i skroget. For å feste de ytterligere og tette igjen eventuelle gliper, blir det lagt et tynt lag med lim ved å bruke limpistol mellom slingrekjølen og skroget. Denne limen holder godt, men samtidig porøs nok til å lett få de av igjen med et par lette slag med hammer. Rekkefølgen i dette forsøket er svært viktig da det ikke mulighet for å tette hullene til tunnelåpningne etter slepingen. Etter alle testene for slingrekjølene er ferdig, blir det tapet over der de har vert plasser og det borres gjennomgående hull til tunnelåpningene i baug og akter. Man starter med den minste tunnel diameteren og øker gradvis til den største diameteren.

For å kunne sammenligne motstanden som ble beregnet ved tidligere forsøk må ballasteringen være så lik som mulig. Ballasten ble beregnet ut fra deplasementet til skipet ved hjelp av modellskalaen som ble satt ved byggingen av modellen. Ved den tidligere testingen ble det laget et regneark, med informasjon om hvor stor vekt som skulle plasseres hvor [14] [Vedlegg 3]. Ut ifra dette blir vektene målt opp, nummerert og riktig plassering funnet.

Modellen plasseres så i vannet. Ballasten blir plassert i henhold til Vedlegg 3 og slepegiret blir festet til snoren. Det blir montert en kraftcelle på slepegiret som måler motstanden båten opplever under slepeforsøkene ved å måle kraften som virker i snoren. Før denne blir montert, gjøres en kontroll måling av kraftcellen ved å teste en oppmålt vekt og se om dette samsvarer med kraften cellen opplever. Dataen man får fra målingene blir brukt til å fremstille en motstandskurve for skipet.



Figur 12, Slepegir og ballastering

#### 2.5.4 Gjennomføring av slepeforsøk

Det første man gjør ved modelltesting er å måle temperaturen i vannet. Dette blir gjort for å kunne anslå viskositeten og tettheten til vannet. Slepesnoren festes til slepegiret ved å plassere snoren under to trinser som festes i hver ende av stangen, samt ved å skru fast snoren til kraftcellen slik at den holdes igjen. Siden motoren ved MarinLab har en hastighetsbegrensning på ca. 1,1 m/s, blir det benyttet fallvekter for å oppnå ønsket hastighet. Det blir også benyttet en akselerasjonsvekt for å akselerere modellen til ønsket hastighet, slik at fallvekten oppfører seg som en konstant skyvekraft ved den ønskede hastigheten. Siden fallvekter ble benyttet ved tidligere forsøk, forenkles prosessen betraktelig.

Modellen slepes frem til enden av tanken, for å så feste på vektene og deretter slepe modellen tilbake til startpunktet. Videre slippes fallvekten og modellen blir dratt gjennom vannet. Etter hver sleping, blir en midlere hastighet og kraft notert. Her er det viktig at en ikke har brukt verken for mye eller for lite akselerasjonsvekt. Om en har for mye, vil modellen få en høyere hastighet enn selve fallvekten greier å holde, slik at hastigheten synker når akselerasjonsvekten treffer bakken. Da er det fare for at bølgesystemet tar igjen modellen. Om en har for lite akselerasjonsvekt, vil modellen bruke lang tid på å oppnå ønsket hastighet og intervallet med gyldig data bli svært kort eller i verstefall ugyldig.

Det er viktig at man venter tilstrekkelig lenge mellom hver sleping, da det er ønskelig med så like testkondisjoner som mulig, for hver sleping. Tiden mellom hver sleping avhenger av hastigheten modellen slepes med, da bølgesystemet til modellen blir større ved høyere hastigheter. Når vannspeilet er helt dødt, er det klart for ny sleping. Ved de største hastighetene blir det ventet opp mot 5 minutter.

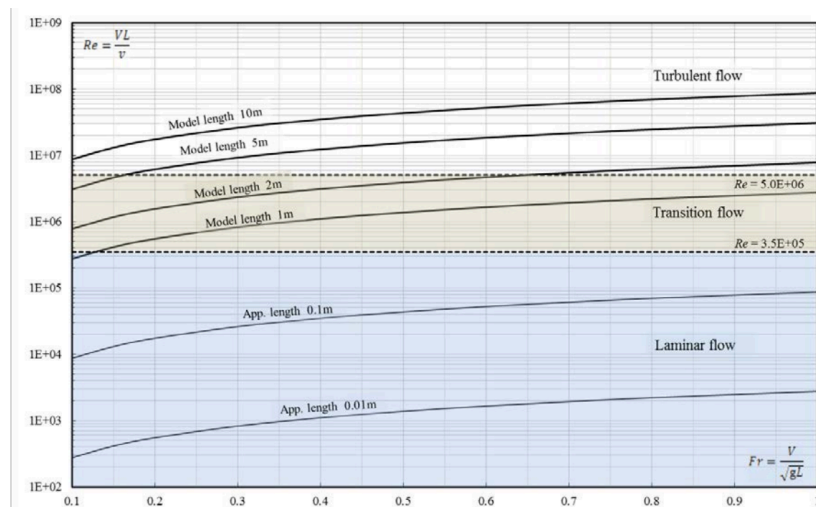
Ved tidligere forsøk ble det gjennomført 35 slepeforsøk for naked hull, derav flere med samme hastighet for å validere motstanden. Med tanke på begrensning av tid i marinlabben og med tanke på at det skal testes sju ulike appendikser, gjennomføres det slepinger ved noen lave, middels og høye hastigheter som gir tilstrekkelig data for å fremstille en fullstendig motstandskurve. Det blir kjørt mellom 10 og 15 slepinger på hvert appendiks, avhengig av kvalitet på resultat. Dette brukes til å finne formfaktoren for modellen ved hjelp av Prohaskas metode. Etter fullført sleping for et appendiks, blir det montert nytt og prosessen startes på ny.

## 2.6 Feilkilder

Ved modelltesting er det veldig mange ulike usikkerhetsfaktorer som kan på virke resultatene. Siden det brukes en relativ liten modell og slepebanen er nokså kort sammenlignet med andre testfasiliteter, er det helt nødvendig å være nøyaktig og konsekvent, slik at resultatene blir så sikre som mulig. De ulike faktorene som spiller inn blir diskutert videre.

Da det er en begrensning på CNC maskinen ved HVL, blir modellen bygget i en skala på 1:47,62. Dette gir en lengde på modellen som tilsier 1,79 m, noe som er opp mot maks lengde for slepetanken. Det er ønskelig å bruke så store modeller som mulig, da målingene blir bedre og resultatene sikrere. Til sammenligning brukes det modeller med en lengde på opptil 8 m ved SINTEF [15]. Slepetanken har en lengde på 50 m som er nokså lite sammenlignet med større testfasiliteter. Dette fører til et kort intervall med gyldig måling, siden modellen bruker noe tid på å akselerere til korresponderende hastighet. Det er også knyttet usikkerhet knyttet til utvelging av data. Etter hvert slep ble en midlere verdi for hastighet og kraft notert, uten mulighet til å lagre dataen fra slepet, for å så analysere dette ved en senere anledning. Det er også noe støy i målingene tatt opp av kraftcellen, da det er relativt små krefter som oppstår.

Ved bruk av små, langsomtgående modeller er følgelig Reynoldstallet mye mindre enn for skipet. Med dette som grunnlag, er det stor sannsynlighet for laminær strømning rundt modellen, noe som det i praksis aldri er rundt skipet. I laminær strømning er friksjonsmotstanden mindre enn i turbulent strømning. Motstand som forekommer på grunn av avløsning og hvirvling er høyere i laminær strømning enn for turbulent [9]. Dette gir problemer knyttet til skalering av appendiksmotstand. Det samme problemet oppstår rundt slingrekjølene, da det lokale Reynoldstallet over appendikset for modellen er mye mindre enn for skipet.



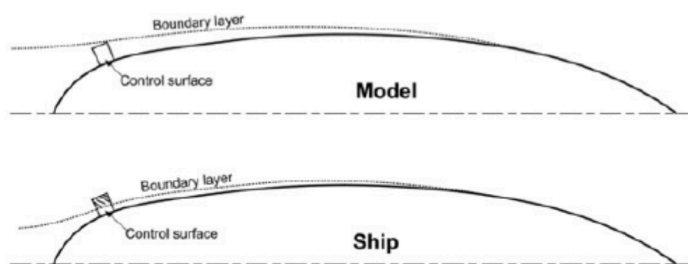
Figur 13, Modell/Appendiks lengde mot Froudetall som viser type strømningsregime de opererer i [16]

Derfor burde det brukes turbulensstimulering for å fremkalle turbulent strømning. I henhold til ITTC, skal dette plasseres fremme på bulben, 5% $L_{pp}$  bak  $FP$ . Det må også fremkalles turbulens foran hvert appendiks, for å sikre turbulens [16]. Dette ble ikke gjort i dette forsøket og kan forklare noe av feilkildene knyttet til resultatene.

Grensesjiktet til modellen er også tykkere enn skipets, altså avløsning skjer lengre fremme på modellen enn skipet. Forholdet mellom ruhet og grensesjikt tykkelse er ikke det samme for modell og skip. Under modelltesting er det da grunn til å tro at kontrolloverflaten til slingrekjølene ligger innenfor eller delvis



innenfor grensesjiktet, men forskipet er det utenfor som vist i. Dette kan både øke og redusere motstanden, avhengig av om strømmingen separeres eller ikke over appendikset [9].



Figur 14, Grensesjikt for modell og skip [9]

Når dette legges til grunn, er skalering av appendiksmotstand svært usikkert. Ulike testfasiliteter har ofte erfaringsbaserte utregningsmetoder som baseres på mange slepeforsøk i ulike skalaer. Derfor er de forskjellige metodene presenter over noe usikre, da slik informasjon ikke er innhentet ved MarinLab.

Siden modellen er bestående av to deler, henholdsvis forskip og akterskip, kan det oppstå skjevheter når dette monteres sammen. Den kan også forekomme ujevnheter under utformingen. En annen bachelorgruppe målte skroget brukt i dette prosjektet, med en 3D-skanner og sammenlignet dette med en 3D-modell og kom frem til at gjennomsnittsavvik på hele modellen er 1,944 mm [17]. Alt dette er parametere som kan påvirke motstanden modellen opplever.

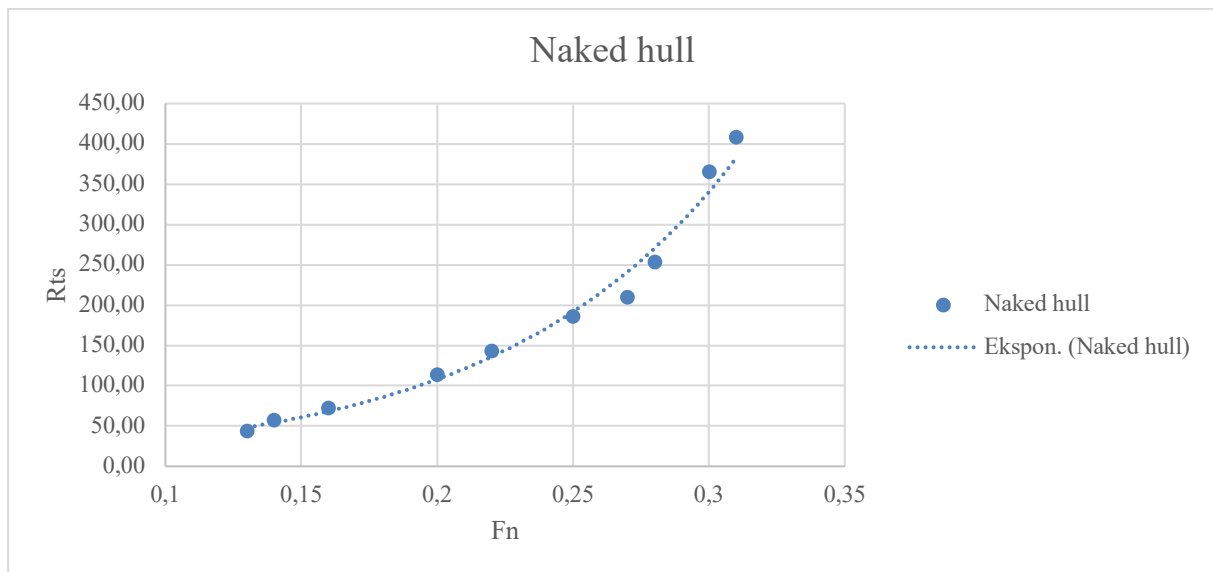
Overflateruheten til modellen er vanskelig å gjengi korrekt. Overflaten til modellen lages derfor glatt og en korreksjons for dette legges til. Da dette bare er en erfaringsbasert formel som benyttes, kan dette gi noe avvik fra hvordan det egentlig ville vert.

Det er syv forskjellige appendikser som skal testes og dermed blir oppsettet til slepingen satt opp og tatt ned tilsvarende ganger. Slepegiret og kraftcellen festet på nytt og ballasteringen gjøres på nytt mellom hver gang. Da kan kraftcellen bli litt forvridd og viser en annen motstand enn ved foregående forsøk. Ballasteringen kan også ha blitt noe forskjøvet, slik at man ikke oppnår samme vektfordeling eller at modellen ligger med litt trim/kreng i vannet. Det er også ønskelig med så like testkondisjoner som mulig mellom hver sleping. Da er det viktig at en venter tilstrekkelig lenge, før en sleper på nytt. Om ikke kan det være forstyrrelser i overflaten, strøm eller virvling i vannet.

For tunnelåpningene i baugen og akter, gjelder Holtrop og Mennens metode bare for baug thrustere. Men det antas at påvirkningen av den aktre tunnelåpningen er minimal, da tykkelsen til hullet er liten. I ITTC-57 metoden blir den våteoverflate av den akterute åpningen inkludert.

### 3. Resultat

I denne seksjonen blir resultatene av slepeprøvene presentert. Disse baseres på beregninger gjort ved de forskjellige metodene utledet i seksjonen 2.4 Teoretisk fremgangsmåte. Alle utregninger for hver sleping kan finnes i Vedlegg 4. Her er all dataen for hver sleping, samt motstandskomponenter utledet. Det første som blir presentert er motstandskurven for *naked hull*, dette er data som baseres på tidligere arbeid [14]. Videre presenteres sammenligningen for de ulike beregningsmetodene, dette kan finnes i Vedlegg 5. Her beregnes appendiksmotstandskoeffisienten, som så skaleres videre til fullskala appendiksmotstand. Appendiksmotstandskoeffisienten blir beregnet fra naked hull totalmotstand som ble funnet i tidligere forsøk [14]. Videre presenteres appendiksmotstanden for slingrekjøler før motstand som følge av tunnelåpninger presenteres. Alle beregningene baseres på metodene utledet i 2.4.2 Appendiksmotstand.



Figur 15, Motstandskurve for naked hull der  $R_{ts}$  er som funksjon av  $F_n$

Fra Figur 15 kan en se den oppskalerte totalmotstandskurven som skipet vil oppleve. For å finne totalmotstanden er det brukt Froude forbedret metode (ITTC-57). Motstandskurven er representert av de blå prikkene som har en eksponentiell stigning ved økende Froude tall. Dette kan forklares ved at hastighet er kvadrert i formelen for totalmotstanden til skipet (Formel 22).

Slingrekjøl Alt.1								
	ITTC-57		ITTC-78		Drag ITTC-78		Holtrop	
<b>Fn</b>	$R_{App.}$ [kN]	<sup>s</sup> % Øk./red.	$R_{App.}$ [kN]	<sup>s</sup> % Øk./red.	$R_{App.}$ [kN]	<sup>s</sup> % Øk./red.	$R_{App.}$ [kN]	<sup>s</sup> % Øk./red.
0,13	-0,393	-0,90	-1,028	-2,34	0,019	0,04	0,335	0,76
0,14	-0,621	-1,08	0,110	0,19	0,039	0,07	0,727	1,27
0,16	0,154	0,21	1,093	1,52	0,050	0,07	0,947	1,32
0,20	0,318	0,28	1,745	1,54	0,067	0,06	1,286	1,14
0,22	0,240	0,17	1,850	1,29	0,086	0,06	1,676	1,17
0,25	1,817	0,98	3,912	2,11	0,122	0,07	2,456	1,32
0,27	3,868	1,85	6,277	3,00	0,128	0,06	2,577	1,23
0,28	6,075	2,40	8,708	3,44	0,133	0,05	2,697	1,06
0,30	3,427	0,94	6,283	1,72	0,151	0,04	3,091	0,85
0,31	4,058	0,99	7,110	1,74	0,162	0,04	3,319	0,81

Tabell 5, Ulike beregningsmetoder for appendiksmotstand (slingrekjøl alt.1)

Som en kan se fra Tabell 5 er det blitt gjennomført fire ulike beregningsmetoder for utregning av appendiksmotstanden som slingrekjøler inducerer. Formlene som er tatt i bruk for disse utregningen er vist i seksjon 2.4.2 Appendiksmotstand. Motstandsøkningen basert på de ulike formlene er sammenlignet med totalmotstanden for skipet uten appendikser og vises som prosentvis økning. ITTC-78 formelen gir de største økning i motstanden. Ved høye Froude tall gir ITTC-57, noe høyere motstandsøkning enn Holtrop og Mennens metode. Om man ser på ITTC-78 Drag, gir den tilnærmet ingen appendiksmotstand og den prosentvise økningen iht. Naked hull er tilnærmet null.

Slingrekjøl Alt.2								
	ITTC-57		ITTC-78		Drag ITTC-78		Holtrop	
<b>F<sub>n</sub></b>	$R_{App.}$ [kN]	% Øk./red.	$R_{App.}$ [kN]	% Øk./red.	$R_{App.}$ [kN]	% Øk./red.	$R_{App.}$ [kN]	% Øk./red.
0,13	-0,152	-0,35	1,009	2,30	0,102	0,23	1,000	2,28
0,14	-0,892	-1,56	0,386	0,67	0,123	0,21	1,228	2,14
0,16	-0,169	-0,24	1,581	2,20	0,167	0,23	1,711	2,38
0,20	-0,078	-0,07	2,286	2,02	0,225	0,20	2,350	2,08
0,22	0,212	0,15	3,304	2,31	0,293	0,20	3,123	2,18
0,25	0,588	0,32	4,309	2,32	0,352	0,19	3,805	2,05
0,27	6,399	3,06	7,110	3,39	0,442	0,21	4,859	2,32
0,28	5,486	2,17	10,573	4,17	0,480	0,19	5,313	2,10
0,30	4,876	1,33	10,362	2,84	0,517	0,14	5,760	1,58
0,31	5,576	1,37	11,397	2,79	0,549	0,13	6,138	1,50

Tabell 6, Ulike beregningsmetoder for appendiksmotstand (slingrekjøl alt.2)

Tabell 6 er satt opp på samme måte som Tabell 5. Ved økende Froude tall gir de ulike metodene en større prosent økning i skipets totalmotstand enn for slingrekjøl alt. 1. Dette skyldes en større våt overflate enn ved foregående slingrekjøl, noe som er i samsvar med teorien. Også her vil ITTC-78 vil gi den største prosentvise økningen. Sammenligner man ITTC-57- og Holtrop og Mennens metode, gir tilsvarende like verdier for appendiksmotstanden, der sistnevnte gir noe høyere. I likhet med foregående slingrekjøl, gir ITTC-78 drag veldig lav appendiksmotstand.

Slingrekjøl Alt.3								
	ITTC-57		ITTC-78		Drag ITTC-78		Holtrop	
<b>Fn</b>	$R_{App.}$ [kN]	% Øk./red.	$R_{App.}$ [kN]	% Øk./red.	$R_{App.}$ [kN]	% Øk./red.	$R_{App.}$ [kN]	% Øk./red.
0,13	1,006	2,29	1,582	3,60	0,030	0,07	0,569	1,30
0,14	0,933	1,63	1,705	2,97	0,039	0,07	0,776	1,35
0,16	1,057	1,47	1,961	2,73	0,053	0,07	1,066	1,48
0,20	1,088	0,96	2,453	2,17	0,069	0,06	1,415	1,25
0,22	1,019	0,71	2,508	1,75	0,082	0,06	1,707	1,19
0,25	0,217	0,12	2,107	1,14	0,095	0,05	1,999	1,08
0,27	1,445	0,69	3,771	1,80	0,116	0,06	2,488	1,19
0,28	1,629	0,64	4,056	1,60	0,126	0,05	2,732	1,08
0,30	2,941	0,80	5,630	1,54	0,135	0,04	2,931	0,80
0,31	3,415	0,84	6,292	1,54	0,144	0,04	3,136	0,77

Tabell 7, Ulike beregningsmetoder for appendiksmotstand (slingrekjøl alt.3)

Som på de foregående slingrekjølene kan man se samme trenden her. ITTC-78 gir den høyeste appendiksmotstanden og ITTC-57 og Holtrop og Mennens metode er tilsvarende like. Igjen gir ITTC-78 Drag en prosentvis økning av motstand tilnærmet null. Appendiksmotstanden er noe lavere for denne slingrekjølen enn for slingrekjøl alt. 2, da den våte overflaten er mindre. Denne slingrekjølen er kortere enn de to foregående og har derfor et annet start- og slutt punkt. Dette kan påvirke strømmingen annerledes og det kan induseres motstand som følge av dette.

Slingrekjøl Alt.4								
	ITTC-57		ITTC-78		Drag ITTC-78		Holtrop	
<b>Fn</b>	$R_{App.}$ [kN]	% Øk./red.	$R_{App.}$ [kN]	% Øk./red.	$R_{App.}$ [kN]	% Øk./red.	$R_{App.}$ [kN]	% Øk./red.
0,13	-0,012	-0,03	0,644	1,47	0,005	0,01	0,180	0,41
0,14	-0,116	-0,20	0,698	1,22	0,009	0,02	0,318	0,55
0,16	0,047	0,07	1,208	1,68	0,012	0,02	0,456	0,64
0,20	0,070	0,06	1,543	1,36	0,016	0,01	0,620	0,55
0,22	0,150	0,10	1,960	1,37	0,020	0,01	0,784	0,55
0,25	0,199	0,11	2,750	1,48	0,028	0,02	1,112	0,60
0,27	0,970	0,46	3,897	1,86	0,032	0,02	1,299	0,62
0,28	1,034	0,41	4,104	1,62	0,036	0,01	1,444	0,57
0,30	1,732	0,47	5,168	1,41	0,038	0,01	1,557	0,43
0,31	1,933	0,47	5,632	1,38	0,041	0,01	1,693	0,41

Tabell 8, Ulike beregningsmetoder for appendiksmotstand (slingrekjøl alt. 4)

Også her vil verdiene fra formel drag ITTC-78 nesten være helt ubetydelig i forskjellen i motstand. Sammenligner en verdiene i Tabell 8 med de andre tabellene, vil en se at denne gir de laveste verdiene av alle forsøkene utført med slingrekjøl.

Videre presenteres resultatene for tunnelåpningene. Her blir det bare benyttet to beregningsmetoder, ITTC-57 og Holtrop og Mennens metode.

Thruster 1.25m				
	ITTC-57		Holtrop	
<b>F<sub>n</sub></b>	<i>R<sub>App, s</sub> [kN]</i>	<i>% Øk./red.</i>	<i>R<sub>App, s</sub> [kN]</i>	<i>% Øk./red.</i>
0,13	-0,217	-0,49	0,130	0,30
0,14	-0,160	-0,28	0,262	0,46
0,16	0,058	0,08	0,335	0,47
0,20	-0,353	-0,31	0,458	0,40
0,22	-0,331	-0,23	0,628	0,44
0,25	-0,417	-0,22	0,786	0,42
0,27	0,342	0,16	0,889	0,42
0,28	0,395	0,16	0,967	0,38
0,30	1,528	0,42	1,130	0,31
0,31	1,688	0,41	1,200	0,29

Tabell 9, Ulike beregningsmetoder for appendiksmotstand (Thruster alt. 1,25m)

I Tabell 9 er appendiksmotstanden, som induseres grunnet tunnelåpninger i baug og hekk, presentert. Også her sammenlignes appendiksmotstanden med totalmotstanden for naked hull og det beregnes prosentvis økning. ITTC-57 gir den høyeste motstandsøkningen.

Thruster 2m				
	ITTC-57		Holtrop	
<b>F<sub>n</sub></b>	<i>R<sub>App, s</sub> [kN]</i>	<i>% Øk./red.</i>	<i>R<sub>App, s</sub> [kN]</i>	<i>% Øk./red.</i>
0,13	0,249	0,57	0,585	1,33
0,14	0,109	0,19	0,699	1,22
0,16	0,442	0,62	0,813	1,13
0,20	0,611	0,54	1,087	0,96
0,22	0,517	0,36	1,559	1,09
0,25	0,729	0,39	2,158	1,16
0,27	1,473	0,70	2,370	1,13
0,28	1,810	0,71	2,685	1,06
0,30	3,915	1,07	2,949	0,81
0,31	5,534	1,36	3,687	0,90

Tabell 10, Ulike beregningsmetoder for appendiksmotstand (Thruster alt. 2m)

Som for Tabell 9 er de samme formlene brukt for utregning utført i Tabell 10. Sammenlignes disse resultatene med tunnelåpningen med 1,25 åpning, ser man at motstandsøkningen er større. På det meste er det 1,36% økning ved ITTC-57 metoden. Ved lave Froude tall gir Holtrop og Mennens metode høyere økning enn ved større Froude tall. Men til gjengjeld gir sistnevnte en mer stabil økning. I ITTC-57 metoden og det høyeste Froude tallet kan en tro at det er en feilmåling, da motstaden her er mye større enn de resterende.



Thruster 3m				
	ITTC-57		Holtrop	
<b>Fn</b>	$R_{App, s} [kN]$	% Øk./red.	$R_{App, s} [kN]$	% Øk./red.
0,13	0,435	0,99	1,209	2,75
0,14	0,497	0,87	1,711	2,98
0,16	1,310	1,82	2,165	3,01
0,20	1,889	1,67	3,005	2,66
0,22	1,966	1,37	3,752	2,62
0,25	2,075	1,12	4,367	2,36
0,27	3,379	1,61	4,856	2,32
0,28	3,582	1,41	5,610	2,21
0,30	4,302	1,18	6,213	1,70
0,31	2,492	0,61	6,826	1,67

Tabell 11, Ulike beregningsmetoder for appendiksmotstand (Thruster alt. 3m)

I Tabell 11 er appendiksmotstand for tunnelåpning med diameter på 3 m presentert. Det er klart større prosentvis økning når man ser på Holtrop og Mennens metode. Også kan man anta at den siste målingen ved ITTC-57 metoden er en feil måling, da denne er mye lavere enn de resterende. Men når en sammenligner de tre ulike diameterne, ser man at motstanden øker ved økende diametere.

Videre kan det være interessant å se på den gjennomsnittlige prosentvise økningen for hver av beregningsmetodene for alle appendikser. Dette blir gjort for å kunne sammenligne de ulike metodene.

Gjennomsnittlig prosentvis økning			
	ITTC-57	Holtrop	ITTC-78
Slingrekjøl alt.1	0,58	1,09	1,42
Slingrekjøl alt.2	0,62	2,06	2,50
Slingrekjøl alt.3	1,02	1,15	2,08
Slingrekjøl alt.4	0,19	0,53	1,49
Tunnelåpning 1,25m	0,29	0,39	N/A
Tunnelåpning 2 m	0,65	1,08	N/A
Tunnelåpning 3 m	1,27	2,43	N/A

Tabell 12, Gjennomsnittlig prosentvis økning for hver av metodene

Som en kan se i Tabell 12 er det ITTC-78 metoden som gir høyest gjennomsnittlig prosentvis økning av totalmotstand, som følger av slingrekjøler. Motstanden tunnelåpninger induserer har størst gjennomsnittlig økning ved Holtrop og Mennens metode.

## 4. Diskusjon

Da skalering av appendiksmotstand ikke har noen fastsatt standardisert metode og ofte er erfaringsbasert hos de ulike testfasilitetene, vil resultatene fra den foregående seksjonen diskuteres og knyttes opp mot aktuelle feilkilder. Resultatene er varierende og det er vanskelig å si hvilken metode som faktisk gir mest nøyaktig svar.

I resultatene blir appendiksmotstanden for de ulike slingrekjølene og tunnelåpningene presentert i både  $kN$  og prosentvis økning/reduksjon av nakedhull. Innledningsvis i 2.2.3 Appendiksmotstand blir det sagt at motstandsøkning som følger av slingrekjøler kan være opp mot 2-3 % for enskrue skip. For noen Froudes tall, kan dette stemme veldig godt. Siden strømmingen og strømningsretningen rundt skroget endres ved økende hastighet, kan en bare optimalisere plassering og design for denne ene hastigheten. Om strømmingen krysser slingrekjølene blir det indusert mer motstand, enn om strømmingen følger slingrekjølen, da avløsning oppstår. Derfor kan denne prosentvise økningen variere på både hastighet, design og plassering.

Totalmotstandskoeffisientene for henholdsvis *appended hull* og *naked hull* blir substrahert, for å få motstandskoeffisienten til appendiksene. Denne koeffisienten blir skalert videre til fullskala. Da det er utarbeidet en fullstendig motstandskurve for denne modellen ved tidligere forsøk, blir det i dette prosjektet testet noen utvalgte hastigheter for naked hull, for å validere det tidligere arbeidet. Denne varierte noe, men da det er tidsbegrensninger ved MarinLab, ble denne godtatt og blir brukt videre i beregninger. Sammensetning av modell og ruhet kan ha blitt endret over tiden. Denne feilen vil påvirke hvor mye appendiksmotstanden utgjør av nakedhull for beregninger gjort ved ITTC 57 metoden.

Modellen er relativt liten i henhold til skalaene andre testfasiliteter opererer med. Dette gjør følgende slingrekjølene og tunnelåpningene veldig små. Det er derfor svært vanskelig å få gode målbare data. Samtidig får man et nokså kort intervall med ønsket hastighet og dermed en begrenset validering av den målte motstanden. Måledataene ble notert etter hvert slep og det er ikke mulig å lagre måledataene og analysere de ved et senere tidspunkt. Dette summert gjør beregningsmetodene noe usikre.

Beregningsmetoden til Holtrop og Mennen er basert på 334 modellforsøk og ut ifra disse resultatene er det laget en erfaringsbasert formel. Fordelen med denne metoden er at det ikke er nødvendig å gjøre modelltest for både naked hull og appended hull. Modelltesting er tidkrevende og kostnadene knyttet til dette er store. Om en da slipper halve arbeidet er dette svært gunstig. Ut ifra sammenligningene av de ulike beregningsmetodene, kan man antyde at Holtrop og Mennens beregningsmetode ikke varierer så mye fra ITTC 57 og 78. Metoden er også applikabel for både slingrekjølene og tunnelåpningene, samt andre tilleggsutstyr som festes på skroget. Ved bruk av ene metoden lansert av ITTC, hvor man anslår dragkreftene som oppstår av appendiks, blir denne kraften svært liten. Den prosentvise økningen ligger på verdier mellom 0,01-0,2%.

På tunnelåpningene anbefales det en avrunding mellom åpningen og skroget på skipet. Dette vil stimulere strømmingen for å minimere motstandsøkning. Grunnet skalaforholdet hadde dette blitt svært lite og vanskelig å få nøyaktig. Det er også vanlig med et gitter foran åpningen for beskyttelse av propulsjonsenheten som er inni. Ingenting av dette ble bygget. Motstanden for den akterute åpningen blir ikke inkludert i Holtrop og Mennens metode. I ITTC metoden blir den våte overflaten inkludert og kan ha korrigerert noe for denne motstandsøkningen. Med dette som grunnlag, kan det forklare hvorfor ITTC 57 metoden og Holtrop og Mennens metode har en noe større differanse for tunnelåpninger.

## 5. Konklusjon

Fra resultatene presenter ovenfor, kan det trekkes noen konklusjoner. Det første som blir lagt merke til, er at "ITTC 78 drag prediction method" ikke gir gode resultater. For alle slingrekjøler gir denne metoden en økning i henhold til naked hull på tilnærmet 0 %. Denne metoden anbefales derfor ikke ved vurdering av appendiksmotstand ved MarinLab HVL.

De andre beregningsmetodene gir noe varierende resultater. Om en analyserer de presenterte verdiene for appendiksmotstand, kan en generelt sett se at ITTC-57 gir lavest verdier og ITTC-78 gir høyest verdier. I henhold til teorien beskrevet i 2.2.3 Appendiksmotstand, er ikke den maksimale økningen som følger av slingrekjøler større enn 2-3% av totalmotstanden. Som en ser i Tabell 12, ligger den gjennomsnittlige prosentvise økningen til Holtrop og Mennens metode for slingrekjøler mellom den gjennomsnittlige økningen for de to andre beregningsmetodene. For tunnelåpningene er det ITTC-57 som gir den høyeste prosentvise økningen. Det er vanskelig å si om det er ITTC 57-, 78- metoden eller Holtrop og Mennens metode som gir det mest realistiske resultatet. Alle metodene gir en relativt lav økning og er derfor ikke kritisk for skipets fremdriftsegenskaper.

På grunnlag av skalaforholdene det opereres med, tidsbesparelsen man oppnår ved å ikke teste appended hull og de presenterte resultatene, kan man anbefale å ikke teste appended hull ved MarinLab. Siden Holtrop og Mennens metode gir en prosentvis økning som ligger mellom de to andre metodene, anbefales det å korrigere for appendiksmotstand med denne metoden.

## Referanser

- [1] S. John, *Ship Hull Appendages: A Case Study*. 2012.
- [2] H. S. Jang, H. J. Lee, Y. R. Joo, J. J. Kim og H. H. Chun, «Some practical design aspects of appendages for passenger vessels,» *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, vol. 1, nr. 1, s. 50-56, 2009.
- [3] H. Walderhaug, «Motstand, framdrift og styring av marine konstruksjoner,» i *Motstand, framdrift, styring*. Trondheim: Marinteknisk Senter, Institutt for Marin Hydrodynamikk, 1992.
- [4] J. H. Jorde, «Rullereduksjon for fartøyer,» s. 1-3.
- [5] E. C. Tupper, *Introduction to naval architecture*, 5. utg. Oxford: Elsevier Ltd., 2013.
- [6] D. A. Taylor, *Introduction to marine engineering*, Rev. 2nd ed. utg. Oxford: Butterworth Heinemann, 1996.
- [7] J. Amdahl, G. Fuglerud og s. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet Marinteknisk, *TMR 4100 - Marin teknikk intro, TMR 4105 - Marin teknikk 1 : kompendium*, 3. utg. utg. Trondheim: Marinteknisk senter, NTNU, 2003.
- [8] S. Steen, «Motstand og propulsjon,» *Propell og foilteori' (Marin Teknikk 3-Hydrodynamikk)*, 2011.
- [9] A. F. Molland, S. R. Turnock og D. A. Hudson, *Ship Resistance and Propulsion: Practical Estimation of Propulsive Power*. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.
- [10] S. Steen, «TMR7 Experimental methods in marine hydrodynamics,» *Marine Technology Center, NTNU, Department of Marine Technology*, 2014.
- [11] *ITTC - Recommended Procedures and Guidelines: Resistance Test, 7.5-02-02-01*, 2017. Tilgjengelig, Hentet: 21.01.19
- [12] *ITTC - Recommended Procedures and Guidelines: 1978 ITTC Performance Prediction Method, 7.5-02-03-01.4*, 2008. Tilgjengelig, Hentet: 15.03.19
- [13] J. Carlton, *Marine Propellers and Propulsion*. Jordan Hill, UNITED KINGDOM: Elsevier Science & Technology, 2012.
- [14] D. Teige, V. Rabben og H. N. Møgster, «Komparativ studie av fiskefartøy med varierende mengde flare,» Bachelor, Institutt for Maskin- og Marinfag, Høgskulen på Vestlandet, Bergen, 2018.
- [15] SINTEF, «Towing Tank,» 2019. [Online]. Tilgjengelig: <https://www.sintef.no/en/all-laboratories/towing-tanks/>, Hentet: 16.05.19.
- [16] *ITTC - Recommended Procedures and Guidelines: Ship Models, 7.5-01-01-01*, 2017. Tilgjengelig, Hentet: 21.01.19
- [17] S. Aadland, H. Sande og M. Trodahl, «Gjennomgang og utvikling av båtbyggings-prosedyre ved Høgskulen på Vestlandet,» Bachelor, Institutt for Maskin- og Marinfag, Høgskulen på Vestlandet, Bergen, 2019.

## Liste over Figurer

Figur 1, Slepetest ved MarinLab HVL .....	13
Figur 2, Modellen .....	15
Figur 3, Inndeling av motstandskomponenter [8].....	17
Figur 4, Strømningsvisualisering.....	19
Figur 5, Illustrasjon for hvordan man finner formfaktoren [3] s.41 .....	22
Figur 6, Resultat strømningsstest forskip.....	26
Figur 7, Resultat strømningsstest akterskip.....	26
Figur 8, Slingrekjøl alt. 2 montert .....	27
Figur 9, De ulike slingrekjølene .....	27
Figur 11, Tunnelåpning alt. 3 hekk.....	28
Figur 10, Tunnelåpning alt. 3 baug.....	28
Figur 12, Slepegir og ballastering.....	29
Figur 13, Modell/Appendiks lengde mot Froudetall som viser type strømningsregime de opererer i [15] .....	30
Figur 14, Grensesjikt for modell og skip [9] .....	31
Figur 15, Motstandskurve for naked hull der $R_{ts}$ er som funksjon av $F_n$ .....	32

## Liste over Tabeller

Tabell 1, Hoveddimensjoner for skipet .....	15
Tabell 2, Størrelser og plassering av slingrekjøler .....	16
Tabell 3, Tunnel diameter og plassering hekk.....	16
Tabell 4, Tunnel diameter og plassering baug.....	16
Tabell 5, Ulike beregningsmetoder for appendiksmotstand (slingrekjøl alt.1) .....	33
Tabell 6, Ulike beregningsmetoder for appendiksmotstand (slingrekjøl alt.2) .....	34
Tabell 7, Ulike beregningsmetoder for appendiksmotstand (slingrekjøl alt.3) .....	35
Tabell 8, Ulike beregningsmetoder for appendiksmotstand (slingrekjøl alt. 4) .....	36
Tabell 9, Ulike beregningsmetoder for appendiksmotstand (Thruster alt. 1,25m).....	37
Tabell 10, Ulike beregningsmetoder for appendiksmotstand (Thruster alt. 2m).....	38
Tabell 11, Ulike beregningsmetoder for appendiksmotstand (Thruster alt. 3m).....	39
Tabell 12, Gjennomsnittlig prosentvis økning for hver av metodene .....	39

## **Vedlegg**

Vedlegg 1 – Hoveddimensjoner og skalering til modell.

Vedlegg 2 – CAD filer for slingrekjøler og tunnelåpninger

Vedlegg 3 – Ballastering

Vedlegg 4 – Motstandsberging

Vedlegg 5 – Sammenligning



