
Hydrodynamisk motstand og bølgerespons til forskjellige utforminger av et ubemannet overflatefartøy



Elise Klemetsen

Masteroppgave i havteknologi
Juni 2020

Institutt for fysikk og teknologi
Universitetet i Bergen

Sammendrag

Motivasjonen bak prosjektet er å videreutvikle en Unmanned Surface Vehicle (USV), et ubemannet overflatefartøy, drevet av batteri og utstyrt med ekkolodd for søk etter fisk og andre biomasser. I samarbeid med Greenfish har NORCE utviklet en USV, også kalt demodrone, som er utgangspunkt for arbeidet presentert her. Formålet med dette prosjektet er å finne et estimat på stabilitet og motstand til en nedskalert, forenklet modell av demodronen, samt en modifisert modell. Stabilitet er viktig for ekkoloddets avlesinger, mens lav motstand er viktig for gunstig utnyttelse av batteri. Hypotesen i dette prosjektet er at USVens stabilitet og motstand vil forandres ved endring av baug til en mer konvensjonell form, spissing av hekk, sammen med tilføring av finner.

Innledningsvis bygges to nedskalerte modeller av USVen, en forenklet modell og en modifisert modell, begge bestående av tre deler. Syv kombinasjoner av baug-, hekk- og finnegeometri testes med slepevogn for å måle motstand. Testene viser at den konvensjonelle utformede baugen bidrar til økt motstand, mens den spissede hekken bidrar til mindre motstand både som baug og hekk. De fordelte finnene bidrar til noe økt motstand.

Tre kombinasjoner av geometrier testes i bølger for å kalkulere Respons Amplitude Operator (RAO), for å analysere bølgebevegelser i hiv, trim og rull. Inngangs- og utgangsdata måles med bølgehøydemåler og et Qualisys Motion-Capture kamerasystem. Eksperimentelle RAO-er valideres ved å måle responsen til en modell i tre ulike bølgespektre. Resulterende er de sammenlignbare i frekvenser høyere enn 1,3 Hz, da betraktelig inkonsistens observeres i lavere frekvenser. Numeriske simuleringer utføres i HydroD for sammenlikning med eksperimenter. På tross av at oppførselen og omfanget av numeriske og eksperimentelle RAO-er er mindre korrelerende, er rangeringen av modellenes respons relativt lik. Numeriske og eksperimentelle RAO-er tilsier at fordelte finner bidrar stabiliserende i rull. Den nedskalerte, modifiserte modellen av demodronen defineres som mest stabil i rull, men som minst stabil i trim. Den forenklete nedskalerte modellen av demodronen betraktes som minst stabil i rull. Konkluderende er kombinasjonen av spisset hekk som baug, med flat hekk og fordelte finner rangert som det mest hensiktsmessige designet, både med hensyn til motstand og stabilitet.

Numeriske RAO-er i frekvenser som ikke er representert i eksperimentelle tester, fremstilles for å finne et estimat på respons i kraftig sjø. Dette for å undersøke om degradering av et ekkolodds funksjon er forventet, sammenliknet med responsdata fra feltprøver av *Sailbuoy*. Resulterende er responsen i trim overstigende trimvinklene i responsdataen. Degradering av et ekkolodds funksjon kan dermed forventes i kraftig sjø.

Forord

Denne oppgaven er skrevet for NORCE, i samarbeid med Geenfish, som har utviklet referansemodellen i dette prosjektet. Denne masteroppgaven er levert for mastergradstudiet i havteknologi ved Universitetet i Bergen (UiB), i samarbeid med Høgskulen på Vestlandet (HVL).

Først vil jeg utnevne en stor takk til veilederen min, Jan Michael Simon Bartl, ved HVL, for svært nyttig støtte, veiledning, dedikasjon, og spesielt for å være svært disponibel med å hjelpe, til enhver tid. Jeg vil også utnevne en stor takk til veilederen min, Anne Ansnes Hageberg, ved NORCE, for svært nyttig veiledning, grundige svar på spørsmål, tillit og gode tilbakemeldinger. Jeg vil også takke veilederen min Camilla Sætre, ved UiB, for god oppfølging, konstruktiv veiledning og støtte.

Jeg vil også takke Bernt Hustad Hembre, avdelingsingeniør ved HVL, for svært nyttig hjelp og veiledning i utførelse av eksperimenter, Thore Clifford Thuestad, førstelektor ved HVL, for god veiledning i numeriske analyser, Gloria Stenfelt, førsteamanuensis ved HVL, for hjelp i utførelse av eksperimenter og hjelp med postprosessering og David Roger Lande-Sudall, førsteamanuensis ved HVL, for veiledning i utførelse av eksperimenter og hjelp med postprosessering.

Jeg vil også rette en takk til Nafez Ardestani, avdelingsingeniør ved HVL, Kjetil Gravelsæter, forskningstekniker ved HVL og Harald Moen, overingeniør ved HVL, for bidrag og veiledning til utforming av modeller.

Avslutningsvis vil jeg rette en stor takk til medstudentene mine, med stort bidrag til motivasjon, støtte og hjelp til utførelse eksperimenter og en stor takk til min kjæreste Geir Olav, for ubeskrivelig støtte.

Innholdsfortegnelse

Sammendrag	i
Forord	ii
Liste over tabeller	v
Liste over figurer	vi
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn og motivasjon	1
1.2 Formål og metode	5
1.3 Hypotese	6
2 Teoretisk bakgrunn	7
2.1 Skalering	7
2.2 Lineær bølgeteori og regulære bølger	9
2.3 Irregulære bølger og bølgespektrum	10
2.4 Seks grader av frihet	12
2.5 Respons Amplitude Operator	13
2.6 Motstand	14
2.6.1 Bølgedannet motstand	15
2.6.2 Viskøs formmotstand	17
2.7 Stabilisatorer	18
3 Metoder	21
3.1 Dimensjonering av nedskalert modell	21
3.2 Modelldesign	23
3.2.1 Modelldesign i Autodesk Inventor	23
3.2.2 Geometriske spesifikasjoner	23
3.2.3 Dimensjonering av fordelte finner	25
3.2.4 Oversikt over modeller	26
3.3 Eksperimentelle metoder	27
3.3.1 MarinLab	27
3.3.2 Slepevogn	28
3.3.3 Motstandsmåling	28
3.3.4 Bølgegenerator	29
3.3.5 Bølgehøydemåler	29
3.3.6 Bevegelsesanalyse	29

3.3.7	Fortøyningsoppsett	31
3.3.8	Databehandling.....	32
3.3.9	Eksperimentelle usikkerheter og mulige feilkilder	32
3.4	Numeriske metoder.....	33
3.4.1	Modelldesign og meshing	33
3.4.2	Hydrodynamisk analyse	35
3.4.3	Postprosessering	38
3.4.4	Numeriske usikkerheter og mulige feilkilder.....	38
4	Resultater og diskusjon.....	39
4.1	Hydrodynamisk motstand.....	39
4.2	Bølgedannet motstand	44
4.2.1	Sammenlikning av målt motstand for modeller med lik vannlinjelengde	44
4.2.2	Illustrasjon av baug- og hekkdannede bølger.....	47
4.2.3	Rangering av bølgedannet motstand sammenliknet med målt motstand	49
4.3	Bølgekalibrering av bølgedata.....	56
4.4	Responsdata fra Qualisys.....	59
4.5	Sammenlikning av eksperimentelle RAO-er	63
4.5.1	Eksperimentelle RAO-er for Modell 7 – JONSWAP-1, -2 og -3	63
4.5.2	Eksperimentelle RAO-er for Modell 1, 2 og 7 – JONSWAP-1	66
4.6	Sammenlikning av eksperimentelle og numeriske RAO-er	69
4.6.1	Eksperimentelle- og numeriske RAO-er for Modell 7.....	69
4.6.2	Eksperimentelle- og numeriske RAO-er for Modell 1, 2 og 7.....	72
4.7	Numerisk RAO i lavere frekvenser	75
5	Konklusjon.....	78
6	Videre arbeid	80
7	Referanser	81
	Vedlegg	84

Liste over tabeller

Tabell 1: Froude-skalering mellom skalert modell og fullskalastruktur med skaleringsfaktor λ	9
Tabell 2: Hoveddimensjoner på den nedskalerte modellen av demodronen.....	23
Tabell 3: Hoveddimensjoner på den modifiserte nedskalerte modellen av demodronen	24
Tabell 4: Dimensjoner på fordelte finner	24
Tabell 5: Oversikt over alle modeller.....	26
Tabell 6: Mesh-egenskaper til Modell 1	34
Tabell 7: Mesh-egenskaper til Modell 2	34
Tabell 8: Mesh-egenskaper til Modell 7	35
Tabell 9: Oversikt over bidrag til massemodell	36
Tabell 10: Antatt massemodell til Modell 1	36
Tabell 11: Antatt massemodell til Modell 2.....	37
Tabell 12: Antatt massemodell til Modell 7.....	37
Tabell 13: Oversikt over hastigheter for fullskalastruktur (V_f) og nedskalert modell (V_m).....	39
Tabell 14: Oversikt over slepetestede modeller	40
Tabell 15: Oversikt over vannlinjelengder til de slepetestede modellene.....	45
Tabell 16: Hastighet, bølgelengde og $\frac{1}{4}$ bølgelengde	47
Tabell 17: Bølgestatistikk for JONSWAP-1	56
Tabell 18: Bølgestatistikk for JONSWAP-2	57
Tabell 19: Bølgestatistikk for JONSWAP-3	58
Tabell 20: Oversikt modelltester i bølger på MarinLab.....	59
Tabell 21: Responsstatistikk til Modell 1 i JONSWAP-1, i 0 grader angrepsvinkel.....	60
Tabell 22: Responsstatistikk til Modell 1 i JONSWAP-1, i 22 grader angrepsvinkel.....	60
Tabell 23: Responsstatistikk til Modell 2 i JONSWAP-1, i 0 grader angrepsvinkel.....	61
Tabell 24: Responsstatistikk til Modell 2 i JONSAP-1, i 22 grader angrepsvinkel.....	61
Tabell 25: Responsstatistikk til Modell 7 i JONSWAP-1, i 0 grader angrepsvinkel.....	62
Tabell 26: Responsstatistikk til Modell 7 i JONSWAP-1, i 22 grader angrepsvinkel.....	62
Tabell 27: Rangering av energieffektivitet og stabilitet i trim og rull	79

Liste over figurer

Figur 1: Det vinddrevne autonome fartøyet <i>Sailbuoy</i> [2]	2
Figur 2: Måling av trim- og rullvinkel for <i>Sailbuoy</i> [6]	2
Figur 3: Opprinnelig skisse av «fiskeridronen» [4]	3
Figur 4: 3D-modell av SWATH-formet asv [7]	3
Figur 5: Design av katamaranformet asv [8]	4
Figur 6: Demodrone (foto: NORCE)	5
Figur 7: Illustrasjon av regulære bølger fra to forskjellige perspektiv. Venstre side viser bølgeprofilen som en funksjon av avstanden på et gitt tidspunkt. Høyre side viser en bølgeprofil som en funksjon av tiden hvor bølgens forplantningslengde x er satt [9].	9
Figur 8: Samlingsprinsippet – en sum av mange enkle sinusbølger, hver med sin egen amplitude, lengde, periode eller frekvens og retning for forplanting, lager irregulære bølger [9].	10
Figur 9: Analyse av målte bølger. Sammenhengen mellom et bølgespektrum og bølgene [9].	11
Figur 10: Sammenlikning av Pierson-Moskowitz og høyere «peaked» JONSWAP-spektrum [12].	11
Figur 11: Seks grader av frihet. Tre translasjoner og tre rotasjoner rundt tyngdepunktet G [14]	12
Figur 12: Energispektre og respons til et skip i irregulær sjøtilstand (illustrert for hiv translasjon) [12].	14
Figur 13: Komponenter i skipsmotstand [12]	15
Figur 14: Bølgemønster produsert av et bevegende trykkpunkt i stille vann [12]	15
Figur 15: Enkelt skipsbølgemønster representert av to trykkpunkter [12]	16
Figur 16: Bølgeforsterkning og kansellering ved hekken: (a) bølgeforsterkning ved hekk og (b) bølgekansellering ved hekk [12].	17
Figur 17: Viskøs formmotstand kalkulering på ikke-viskøst strømmetilfelle på et vilkårlig legeme [12].	17
Figur 18: Viskøs formmotstand kalkulering for trykk som virker på en skallplate på et skip [12].	18
Figur 19: Fordelte finner [15].	19
Figur 20: Oversikt over hoveddimensjoner på den nedskalert modellen av demodronen	24
Figur 21: Oversikt over hoveddimensjoner på den modifiserte nedskalerte modellen av demodronen	24
Figur 22: Oversikt over dimensjoner på fordelte finner	25
Figur 23: Oversikt over MarinLab [16].	27
Figur 24: Kalibrering av lastcelle	28

Figur 25: Bølgehøydemåler [23]	29
Figur 26: Oversikt over et vilkårlig systems oppsett og arbeidsområde i Qualisys Track Manager [23]	30
Figur 27: Fartøyets seks grader av frihet.....	30
Figur 28: Fordeling av reflekterende markører på modellen	31
Figur 29: Skisse av fortøyningsoppsett	31
Figur 30: Modell 1 i GeniE	33
Figur 31: Meshet numerisk modell til Modell 1	34
Figur 32: Meshet numerisk modell til Modell 2	34
Figur 33: Meshet numerisk modell til Modell 7	35
Figur 34: Meshet panelmodell til Modell 1 i HydroD	36
Figur 35: Meshet panelmodell til Modell 2 i HydroD	37
Figur 36: Meshet panelmodell til Modell 7 i HydroD	37
Figur 37: Resultater fra slepetester.....	41
Figur 38: Resultater fra slepetester i lave hastigheter	41
Figur 39: Motstandsranking i lave hastigheter.....	42
Figur 40: Resultater fra slepetester i middels hastigheter	42
Figur 41: Motstandsranking i middels hastigheter.....	43
Figur 42: Resultater fra slepetester i høye hastigheter	43
Figur 43: Motstandsranking i høyere hastigheter.....	44
Figur 44: Resultater fra Slepetest 1 og 6	45
Figur 45: Resultater fra Slepetest 2 og 5	46
Figur 46: Resultater fra Slepetest 4 og 7	46
Figur 47: Baugbølger mot hekkbølger for Slepetest 3, vannlinjelengde langs x-aksen og bølgehøyde langs y-aksen	47
Figur 48: Baugbølger mot hekkbølger for Slepetest 2 og 5, vannlinjelengde langs x-aksen og bølgehøyde langs y-aksen	48
Figur 49: Baugbølger mot hekkbølger for Slepetest 4 og 7, vannlinjelengde langs x-aksen og bølgehøyde langs y-aksen	48
Figur 50: Baugbølger mot hekkbølger for Slepetest 1 og 6, vannlinjelengde langs x-aksen og bølgehøyde langs y-aksen	49
Figur 51: Differanse mellom baugbølgehøyde og hekkbølgehøyde (venstre), samt målt motstand for Slepetest 2, 3, 4 og 6 (høyre) i hastigheter fra 1,272 til 1,640 m/s	50
Figur 52: Differanse mellom baugbølgehøyde og hekkbølgehøyde (venstre), samt målt motstand for Slepetest 2, 3, 4 og 6 (høyre) i hastigheter fra 0,546 til 1,089 m/s	51
Figur 53: Differanse mellom baugbølgehøyde og hekkbølgehøyde (venstre), samt målt motstand for Slepetest 2, 3, 4 og 6 (høyre) i hastigheter fra 0,182 til 0,363 m/s	52

Figur 54: Differanse mellom baugbølgehøyde og hekkbølgehøyde (venstre), samt målt motstand for Slepetest 1, 5 og 7 (høyre) i hastigheter fra 1,272 til 1,640 m/s	53
Figur 55: Differanse mellom baugbølgehøyde og hekkbølgehøyde (venstre), samt målt motstand for Slepetest 1, 5 og 7 (høyre) i hastigheter fra 0,546 til 1,089 m/s	54
Figur 56: Differanse mellom baugbølgehøyde og hekkbølgehøyde (venstre), samt målt motstand for Slepetest 1, 5 og 7 (høyre) i hastigheter fra 0,182 til 0,363 m/s	55
Figur 57: Eksperimentelt og teoretisk bølgespekter for JONSWAP-1	56
Figur 58: Tidsserie for et utsnitt av JONSWAP-1	56
Figur 59: Eksperimentelt og teoretisk bølgespekter for JONSWAP-2	57
Figur 60: Tidsserie for et utsnitt av JONSWAP-2	57
Figur 61: Eksperimentelt og teoretisk bølgespekter for JONSWAP-3	58
Figur 62: Tidsserie for et utsnitt av JONSWAP-3	58
Figur 63: Responsdata til Modell 1 i JONSWAP-1, i 0 grader angrepsvinkel	60
Figur 64: Responsdata til Modell 1 i JONSWAP-1, i 22 grader angrepsvinkel	60
Figur 65: Responsdata til Modell 2 i JOSNWAP-1, i 0 grader angrepsvinkel	61
Figur 66: Responsdata til Modell 2 i JOSNWAP-1, i 22 grader angrepsvinkel	61
Figur 67: Responsdata til Modell 7 i JONSWAP-1, i 0 grader angrepsvinkel	62
Figur 68: Responsdata til Modell 7 i JONSWAP-1, i 22 grader angrepsvinkel	62
Figur 69: Oversikt over bølgespektre, responsspektre i hiv og RAO i hiv for Modell 7 i JONSWAP-1, -2 og -3	63
Figur 70: Oversikt over bølgespektre, responsspektre i trim og RAO i trim for Modell 7 i JONSWAP-1, -2 og -3	64
Figur 71: Oversikt over bølgespektre, responsspektre i rull og RAO i rull for Modell 7 i JONSWAP-1, -2 og -3	65
Figur 72: Oversikt over målte bølgespektre, responsspektre i hiv og RAO i hiv for Modell 1, 2 og 7 i JONSWAP-1 med $\alpha = 0^\circ$ til venstre og $\alpha = 22^\circ$ til høyre	66
Figur 73: Oversikt over målte bølgespektre, responsspektre i trim og RAO i trim for Modell 1, 2 og 7 i JONSWAP-1 med $\alpha = 0^\circ$ til venstre og $\alpha = 22^\circ$ til høyre	67
Figur 74: Oversikt over målte bølgespektre, responsspektre i rull og RAO i rull for Modell 1, 2 og 7 i JONSWAP-1 med $\alpha = 0^\circ$ til venstre og $\alpha = 22^\circ$ til høyre	68
Figur 75: Oversikt over målte bølgespektre, eksperimentelle- og numeriske responsspektre i hiv og RAO i hiv for Modell 7 i JONSWAP-1, -2, og -3	69
Figur 76: Oversikt over målte bølgespektre, eksperimentelle- og numeriske responsspektre i trim og RAO i trim for Modell 7 i JONSWAP-1, -2, og -3	70
Figur 77: Utdrag fra eksperimentell og numerisk RAO i trim for Modell 7 i JONSWAP-1, -2, og -3	70
Figur 78: Oversikt over målte bølgespektre, eksperimentelle- og numeriske responsspektre i rull og RAO i rull for Modell 7 i JONSWAP-1, -2, og -3	71

Figur 79: Eksperimentell og numerisk RAO i hiv for Modell 1, 2 og 7 i JONSWAP-1 med $\alpha = 0^\circ$ og $\alpha = 22^\circ$	72
Figur 80: Eksperimentell og numerisk RAO i trim for Modell 1, 2 og 7 i JONSWAP-1 med $\alpha = 0^\circ$ og $\alpha = 22^\circ$	73
Figur 81: Eksperimentell og numerisk RAO i rull for Modell 1, 2 og 7 i JONSWAP-1 med $\alpha = 0^\circ$ og $\alpha = 22^\circ$	74
Figur 82: Tilnærmet <i>Sailbuoy</i> -bølgespektrum og JONSWAP-1 * 103	76
Figur 83: Numerisk RAO i rull og respons i rull i 0,75m bølgehøyde for Modell 1, 2 og 7 med $\alpha = 0^\circ$ og $\alpha = 22^\circ$	76
Figur 84: Numerisk RAO i trim og respons i trim i 0,75m bølgehøyde for Modell 1, 2 og 7 med $\alpha = 0^\circ$ og $\alpha = 22^\circ$	77

1 Innledning

Innledningskapittelet starter med å se på bakgrunnen til autonome havgående fartøy og motivasjonen for å utvikle et ubemannet fartøy til å gjøre søk etter fisk og andre biomasser. Deretter presenteres formålene med oppgaven, samt tilnærmingen til hvert punkt.

1.1 Bakgrunn og motivasjon

I en artikkel fra NRK [3] hevder Roald Jonassen, daglig leder i Greenfish, at fokuset på å få ned forbruket av drivstoff i fiskerier er stadig økende. Garantikassen for fiskere (GFF) anslår i 2017 at forbruket for fiskere i Norge var på mellom 215 og 218 millioner liter drivstoff. Forbruket er antageligvis noe høyere, da en del fartøy har avgiftsfritak for fiske utenfor norsk økonomisk sone [3]. Jonassen anslår at inntil 50 prosent av gangtida på fiskerfartøyene går med til å finne fisken [3]. I en artikkel i fiskeribladet [4] sier Jonassen at særlig i Nord-Norge er det mange perioder der dårlig vær hindrer fiskefartøy fra å gå ut på havet og sette bruk. Jonassen foreslår at den delen av arbeidet som inkluderer søk etter fisk, kan erstattes med et autonomt system, som potensielt kan halvere drivstofforbruket til fiskerfartøy. En løsning på dette er å utvikle en elektrisk havgående drone, som kan gå i sjøen i opptil et døgn om gangen [4]. Den vil utstyres med en GPS og ekkolodd, så den kan sendes til havs for å kartlegge hvor fisken befinner seg.

Droner har nylig blitt brukt i bred variasjon av feltområder. Det mest aktive feltet er luftfartdroner, der forskjellige droner brukes i kamp til å utføre ubemannet overvåking og angrep. I tillegg brukes de i andre felt, som monitorering av skrogbrann, grenseovervåking, kringkasting, luftundersøkelser og miljøovervåking [5]. Når det kommer til bruk av droner som kjøretøy, er bruk av droner i den marine sektoren noe lavere, enn i luftfart og kjøretøysektoren. En rekke firmaer driver med forskning og utvikling, spesielt innen luftfart og kjøretøy. Bare noen få firmaer er representative for utføring av forskning og utvikling innen det marine feltet. Konvensjonelle marine droner er foreløpig mest brukt i det offentlige og militære feltet [5].

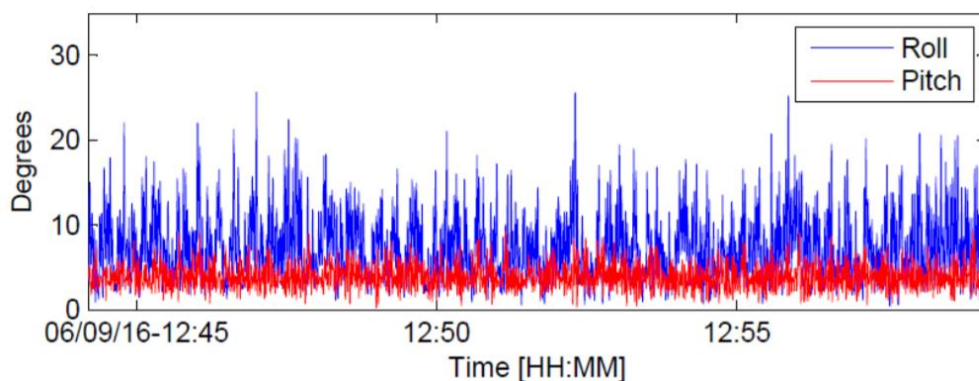
En artikkel «Fish finding with autonomous surface vehicles for the pelagic fisheries» publisert i 2016, presenterer et utviklet og demonstrert konsept for et autonomt fiskekartleggingssystem for pelagiske fiskerier [6]. Kommersielle tilgjengelige USVer er fortsatt mest brukt til vitenskapelige hensikter, mens deres potensielle bidrag til økt bærekraft i kommersielle

fiskerier er svært underbenyttet. Et komplett, autonomt kartleggingssystem for fisk ble verifisert under feltprøver i Norge i 2016 og vises i Figur 1. Prosjektet ble utviklet på motivasjon av at ubrukt eller ikke-håndtert fangst representerer mer enn 40 prosent av marin global fangst [1].



Figur 1: Det vinddrevne autonome fartøyet *Sailbuoy* [2]

Konseptet med autonom fiskeleting med *Sailbuoy* ble vellykket verifisert under feltprøver i Norge i 2016, av den utviklede prototypen som produserer komprimerte ekkogram. Det tillater observasjon av fiskestimer med norsk vårgytende sild, individuelle fisker og havbunn på dybder ned til 280 meter [6]. Det ble ikke observert degradering av muligheten til å oppdage fiskestimer på grunn av trim eller rull som fartøyet opplevde i kraftig sjø med signifikant bølgehøyde opp til 1,5 meter. Vindhastigheten var omtrent 7 m/s og den gjennomsnittlige bølgehøyden 0,5 meter. Målingene i trim og rull vises i Figur 2, der trimvinkelene målte mellom 0,4 og 9,9 grader og rullvinklene mellom 0,4 og 25,7 grader [6].



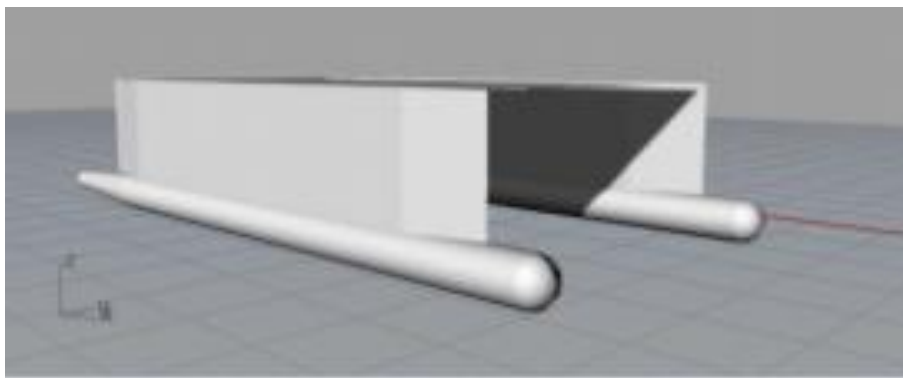
Figur 2: Måling av trim- og rullvinkel for *Sailbuoy* [6]

Imens det autonome fartøyet *Sailbuoy* drives av vind og sol og har stor rekkevidde, skal dronen som Greenfish søke å utvikle kunne gå langs kysten. Den skal utstyres med en batteripakke om bord, slik at den kan gå hurtig i overflaten til enhver tid. Den skal ikke være avhengig av vær og vind og kan dekke små fjorder og trange farvann [4]. Denne dronen, eller såkalte USVen, vil bidra til mindre utslipp og effektiviserte dager til havs for fiskefartøyet. Dette ettersom mannskapet allerede vil ha kunnskap om hvor fisken befinner seg fra USV-observasjonene. I tillegg til reduserte utgifter, vil det bidra til redusert risiko, da mannskapet vil ha færre dager til havs. En opprinnelig skisse av den såkalte fiskeridronen vises i Figur 3.



Figur 3: Opprinnelig skisse av «fiskeridronen» [4]

Artikkelen «Intact stability and seakeeping characteristics of autonomous surface vehicle (asv) using swath hullform to support bathymetry survey activities on the coastal area» fokuserer på et autonomt overflatefartøy for undersøkelse av batymetri [7]. Konkluderende er et «SWATH»-formet skrog fordelaktig på grunn av dets lave motstand, og kan dermed utrustes med en mindre motor. Et slikt «SWATH»-skrog vises i Figur 4.



Figur 4: 3D-modell av SWATH-formet asv [7]

Artikkelen “Design of an autonomous surface vehicle used for marine environment monitoring” presenterer et design av en asv for bruk til monitorering av marint miljø eller hydrologiske undersøkelser [8]. Her er en katamaran brukt for å forbedre stabiliteten i bølger, og skrogformen til høyhastighetsskip er utnyttet for å redusere motstanden. Utformingen av høyhastighetskatamaranen vises i Figur 5 og defineres som en anvendbar asv for miljøovervåking [8].



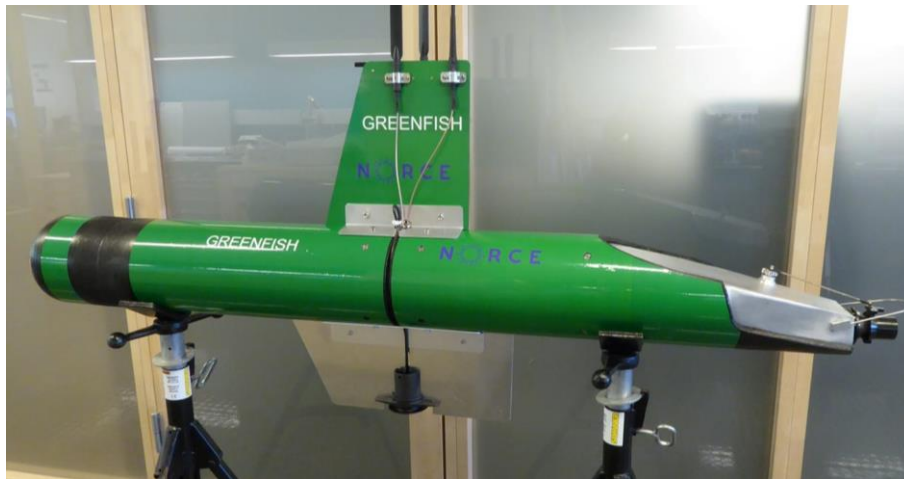
Figur 5: Design av katamaranformet asv [8]

For at en USV skal være i stand til å lese havmiljøet og oppdage hvor fisken er, vil den utstyres med et ekkolodd. Det er et elektronisk instrument som tegner et bilde av vannsøylen ved bruk av akustikk. Dette skjer ved at en giver, ofte kalt en «svinger» eller «transduser», sender lydbølger ned i havdypet og lytter etter refleksjoner. Dette fremstilles grafisk, men for at ekkoloddets avlesninger skal gi best mulig visuell fremstilling av havmiljøet er stabilitet svært avgjørende. En delvis løsning er at ekkoloddet plasseres i en gimbal. Det er en anordning som brukes til å holde et instrument horisontalt i et bevegelig fartøy eller fly, typisk bestående av ringer svingt i rette vinkler. Resten av løsningen må løses gjennom utformingen av skroget.

For at USVens gangtid skal optimaliseres er utnyttelse av batteri svært sentralt, der skrogets utforming og fremdriftssystem er to avgjørende faktorer. Utvikling av fremdriftssystemet vil ikke inngå i denne avhandlingen. I dette prosjektet er skrogets utforming den utslagsgivende faktoren for omfanget av motstand under fremdrift.

Kjøreruten til USVen skal bestemmes og programmeres før den kjøres ut. Robusthet er derfor svært viktig, da USVen kjører på en gitt rute og foreløpig ikke er i stand til å oppdage hindringer i vannet. I denne sammenhengen betyr det at utstikkende deler og for eksempel et katamaran- eller «SWATH»-formet skrog er ugunstig. I fremtiden kan det være mulig å anvende kunstig intelligens på USVens kjørerute. Det kan muliggjøre at USVen klarer å endre rute dersom den

oppdager fisk, slik at den er i stand til å følge etter fisken. En prototype er utviklet i samarbeid mellom Greenfish og NORCE, bestående av et sylindrisk skrog med vannjet som fremdriftssystem. Denne vises i Figur 6. Modellen har en dypgående kjøler, der ekkoloddet plasseres. Kjøleren er også utstyrt med ekstra vekt, med intensjon om økt stabilitet. Modellen har også en utstikkende finne på oversiden, utstyrt med instrumenter, slik at signaler kan sendes inn til land.



Figur 6: Demodrone (foto: NORCE)

1.2 Formål og metode

Formålet med dette prosjektet er å finne et estimat på stabilitet og motstand til en nedskalert modell av demodronen, samt en modifisert modell. Denne tilnærmingen utføres gjennom eksperimenter på MarinLab, et forskningsanlegg ved Høgskulen på Vestlandet. En nedskalert modell benyttes, med hensyn til at veggeffektene fra bølgetanken skal minimaliseres. Dette ettersom en større modell bidrar til mer refleksjoner av bølgene fra tankveggene. For å forsterke den eksperimentelle tilnærmingen til estimert stabilitet, er en programvarepakke av SESAM av DNV GL benyttet [17]. For å bestemme hvorvidt modellens bevegelse i bølger er forventet å degradere ekkoloddets avlesninger, er numeriske analyser utført. Dette for å sammenlikne med bevegelsesdata fra feltprøver av *Sailbuoy*.

Tilnærmingen til estimert motstand er basert på å måle motstanden i en lastcelle som er forankret mellom et fartøy og en slepevogn. Dette under testkjøring av slepevognen med fremdriftshastighet. Ved å bruke Signal Analyzer i MATLAB kan akselerasjon og nedbremsing kuttes fra målingene. Gjennomsnittet av den målte motstanden i oppnådd fremdriftshastighet er estimatet på motstanden til fartøyet i en gitt hastighet.

Tilnærmingen til estimert stabilitet baseres på å bruke målt bølgespektrum som inngangsdata og målt responspekter som utgangsdata. Det inngående bølgespekteret bestemmes av passende bølgelengder og bølgehøyder, mens utgangsbevegelsen til fartøyet måles imens den blir utsatt for det nevnte bølgespektret. Bevegelsen av fartøyet blir målt i alle seks grader av frihet. Gjennom et skript i MATLAB er det mulig å lage Respons Amplitude Operator (RAO) av det flytende fartøyet. RAO-en viser modellens responsoppførsel i forskjellige frekvenser i dets respektive grader av frihet. Følgelig kan RAO-en brukes til å forutse responsen til modellen i forskjellige lokasjoner.

I SESAM, er tilnærmingen basert på numerisk modellering og passende meshing, etterfulgt av hydrodynamiske analyser som lager RAO-er. For at resultatene skal være virkelighetsnære, som sammenlikningsgrunnlag for eksperimentene, må modellene være nøyaktig gjenskapt i programvaren. Det går ut på at størrelse, vekt og utforming av den numeriske modellen korresponderer med den fysiske modellen.

1.3 Hypotese

USVens stabilitet og motstand vil forandres ved endring av baug til en mer konvensjonell form og spissing av hekk, sammen med tilføring av finner. Dette undersøkes gjennom eksperimenter og simuleringer. Effekten av finner skal kvantifiseres i stabilitet, i form av trim og rull i relevante sjøtilstander og hvorvidt den hydrodynamiske motstanden øker eller synker. Baug- og hekkgeometri skal kvantifiseres for reduksjon eller økning av hydrodynamisk motstand.

2 Teoretisk bakgrunn

Dette kapitlet gjennomgår teorien som ligger til grunn for dette prosjektet. Første delkapittel presenterer skaleringsmetode mellom en modell og fullskalastruktur for en gitt nedskalingsfaktor. Neste delkapittel presenterer lineær bølgeteori og regulære bølger. Tredje delkapittel inneholder teori om irregulære bølger og bølgespektre. Fjerde delkapittel beskriver seks grader av frihet. Følgelig formulerer femte delkapittel Respons Amplitude Operator (RAO). Sjette delkapittel presenterer hvilke komponenter som bidrar til et fartøys motstand, fokusert på bølgedannet motstand og viskøs formmotstand. Det siste delkapitlet presenterer teori om stabilisatorer, rettet til fordelte finner.

2.1 Skalering

Dimensjonsløse tall, som Reynolds tall og Froudes-tall, kan brukes til å korrelere målinger gjort på en mindre fysisk modell til ekvivalente verdier for en fullskalastruktur. Dette tillater utførelse av eksperimenter med relativt lave kostander og små modeller, i stedet for å bygge flere fullskalastrukturer [9]. Fysiske modelleksperimenter krever en form for likhet mellom modellen og fullskalastrukturen, slik som de følgende punktene.

- Geometrisk likhet: Modellen må ha fysiske dimensjoner som er proporsjonale til fullskalastrukturen
- Kinematisk likhet: Hastighetene til modellen må være proporsjonale til fullskalastrukturen
- Dynamisk likhet: Krefter og akselerasjoner på modellen må være proporsjonale til fullskalastrukturen.

I de sammenfallende koordinatene til den nedskalerte modellen og fullskalastrukturen krever de tre overnevnte likhetene at alle lokasjonsvektorer, hastighetsvektorer og kraftvektorer har samme retning. I tillegg må størrelsen relateres til hverandre i konstant proporsjon.

Når en fri overflate er til stede, blir gravitasjonskrefter viktige. Dette gjelder ethvert tilfelle der en vannoverflate eller bølger er til stede. Treghtetskrefter og trykkrefter er nesten universalt viktige. Det gjør det passende å holde forholdet mellom treghtets- eller trykkrefter og gravitasjonskrefter likt for modellen og fullskalastrukturen. Kvadratrotten av dette forholdet gir Froude-skalering, også kalt Froudes-tall og defineres i Formel (1).

$$F_n = \sqrt{\frac{F_I}{F_G}} = \sqrt{\frac{\rho \cdot l^2 \cdot v^2}{\rho \cdot g \cdot l^3}} = \frac{v}{\sqrt{g \cdot l}}. \quad (1)$$

Hvor F_n er det dimensjonsløse Froudes-tallet, F_I og F_G er henholdsvis treghetskrefter og gravitasjonskrefter, ρ er væskens tetthet, l er lengden av fartøyet, g er tyngdekraften og v er den relative hastigheten mellom fartøyet og væsken. Dersom F_n holdes lik for både fullskalastrukturen (indeks F) og den nedskalerte modellen (indeks M) kan hastigheten til modellen uttrykkes slik i Formel (2).

$$\frac{v_F}{\sqrt{g \cdot l_F}} = \frac{v_M}{\sqrt{g \cdot l_M}} \rightarrow v_F = v_M \cdot \sqrt{\frac{l_F}{l_M}} = v_M \cdot \sqrt{\lambda}. \quad (2)$$

Hvor $\frac{l_F}{l_M}$ er forholdet mellom lengden av fullskalastruktur og nedskalert modell, hvilket gir den dimensjonsløse skaleringsfaktoren λ .

Reynoldstallet er forholdet mellom treghetskrefter og viskøse krefter, som vises i Formel (3).

$$R_n = \frac{F_I}{F_V} = \frac{\rho \cdot l^2 \cdot v^2}{\mu \cdot v \cdot l} = \frac{\rho \cdot l \cdot v}{\mu}. \quad (3)$$

Hvor R_n er det dimensjonsløse Reynoldstallet, F_V er den viskøse kraften og μ er den dynamiske viskositeten. Ved å beholde R_n lik for både fullskalastrukturen og den skalerte modellen, beregnes hastigheten som i formel (4).

$$\frac{\rho_F \cdot l_F \cdot v_F}{\mu_F} = \frac{\rho_M \cdot l_M \cdot v_M}{\mu_M} \rightarrow v_F = v_M \cdot \frac{l_M}{l_F} \cdot \frac{\rho_M}{\rho_F} \cdot \frac{\mu_F}{\mu_M} = v_M \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{\rho_M}{\rho_F} \cdot \frac{\mu_F}{\mu_M}. \quad (4)$$

Formel (2) og Formel (4) kan ikke tilfredsstilles samtidig, hvilket gjør det umulig å oppnå en modelltest med et passende forhold mellom treghets-, gravitasjons- og viskøse krefter. Gravitasjonskrefter blir viktige når en fri overflate er til stede. Froudes-tall brukes derfor i dette prosjektet, da det beskriver forholdet mellom kinetiske fluidkrefter og gravitasjonskrefter. Dette på tross av at det ikke nødvendigvis gir nøyaktige viskøse krefter [10].

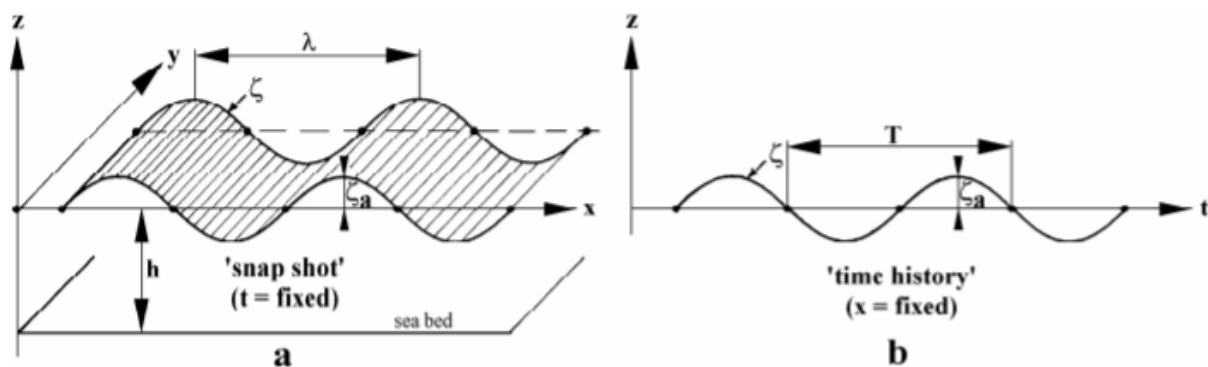
Tabell 1 viser Froude-skaleringsforhold for forskjellige parametre mellom fullskalastruktur og nedskalert modell, derivert fra Formel (2), når λ er skaleringsfaktoren.

Tabell 1: Froude-skalering mellom skalert modell og fullskalastruktur med skaleringsfaktor λ

Parameter	Enhet	Forhold
Lengde	[m]	$l_F = \lambda \cdot l_M$
Areal	[m ²]	$A_F = \lambda^2 \cdot A_M$
Volum	[m ³]	$\nabla_F = \lambda^3 \cdot \nabla_M$
Masse	[kg]	$m_F = \lambda^3 \cdot m_M \cdot \frac{\rho_F}{\rho_M}$
Time	[s]	$t_F = \sqrt{\lambda} \cdot t_M$
Hastighet	[m/s]	$v_F = \sqrt{\lambda} \cdot v_M$
Akselerasjon	[m/s ²]	$a_F = a_M$
Kraft	[N]	$F_F = \lambda^3 \cdot F_M \cdot \frac{\rho_F}{\rho_M}$
Energi	[J]	$E_F = \lambda^4 \cdot E_M \cdot \frac{\rho_F}{\rho_M}$

2.2 Lineær bølgeteori og regulære bølger

Den enkleste bølgeteorien oppnås ved at bølgehøyden er mye mindre enn både bølgelengden og vanddybden. Denne teorien refereres til som lineær bølgeteori. For lineære regulære bølger, er bølgetoppens høyde lik bølgebunnens høyde, betegnet som bølgeamplituden, dermed er $H = 2\zeta_a$ [11], hvor H er bølgehøyden og ζ_a er amplituden. En regulær, harmonisk bølge kan beskrives som en kontinuerlig sinusbølge med konstante periodiske svingninger som illustreres i Figur 7 [9].



Figur 7: Illustrasjon av regulære bølger fra to forskjellige perspektiv. Venstre side viser bølgeprofilen som en funksjon av avstanden på et gitt tidspunkt. Høyre side viser en bølgeprofil som en funksjon av tiden hvor bølgens forplantningslengde x er satt [9].

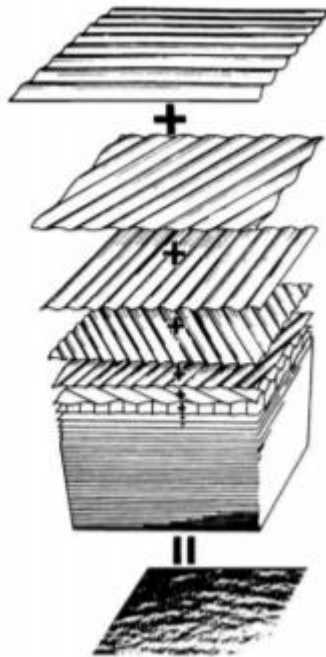
For forplantning langs x-aksen, kan en regulær bølge ha en profil som uttrykkes som

$$\zeta = \zeta_a \sin(\omega t - kx) . \quad (5)$$

Hvor $\zeta_a = \frac{H}{2}$ er bølgeamplituden, gitt at H er bølgehøyden, $\omega = \frac{2\pi}{T}$ er vinkelfrekvensen i [rad/s] hvor T er bølgeperioden, t er tiden som undersøkes, $k = \frac{2\pi}{\lambda_w}$ er bølgetallet i [rad/m], hvor λ_w er bølgelengden og x er avstanden langs x-aksen.

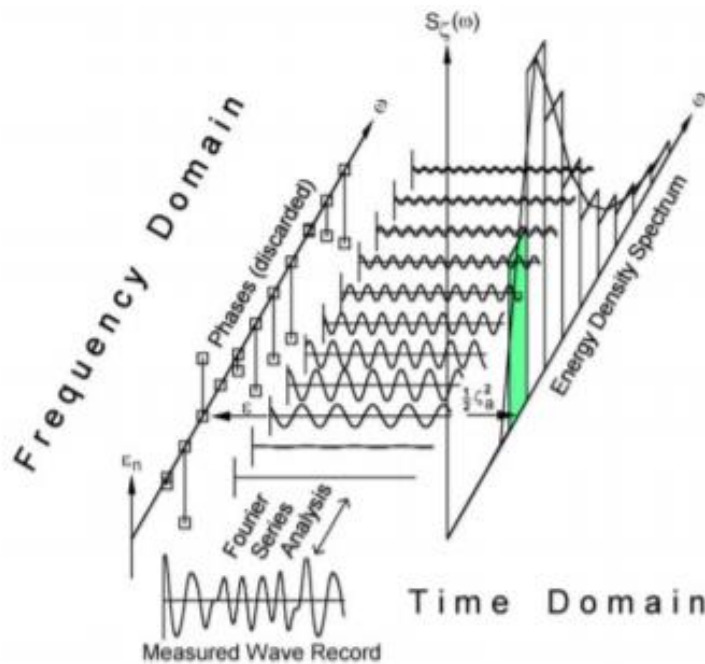
2.3 Irregulære bølger og bølgespektrum

Bølger kan genereres på flere måter, for eksempel ved vind eller tidevann. Spesielt vindbølger er veldig irregulære, men de kan likevel betraktes som en samling av flere enkle, regulære og harmoniske bølgekomponenter. Disse bølgekomponentene har hver sin egen amplitude, lengde, periode eller frekvens og retning for forplantning. Et slikt konsept er nyttig, da det muliggjør å forutse veldig kompleks og irregulær oppførsel, i form av mye enklere teori for regulære bølger [9]. Dette prinsippet illustreres i Figur 8.



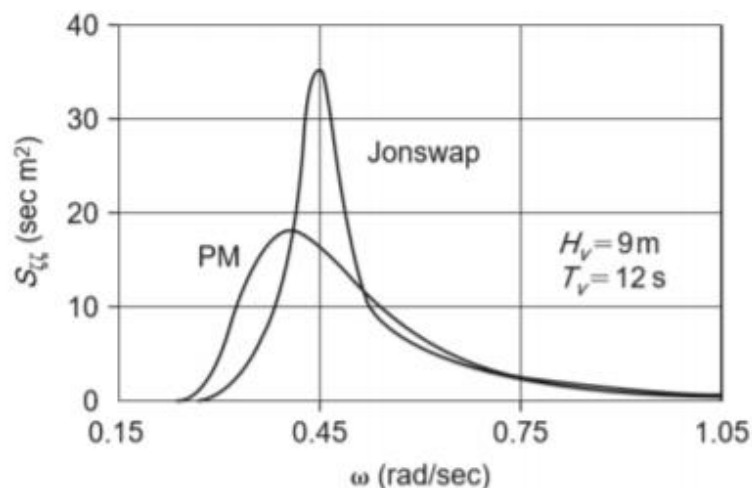
Figur 8: Samlingsprinsippet – en sum av mange enkle sinusbølger, hver med sin egen amplitude, lengde, periode eller frekvens og retning for forplantning, lager irregulære bølger [9].

Korttids-stasjonære irregulære bølger kan beskrives av et bølgespektrum, hvilket er en «power spectral density function» av den vertikale havoverflate-forskyvningen [11]. Figur 9 viser sammenhengen mellom et bølgespektrum og bølgene.



Figur 9: Analyse av målte bølger. Sammenhengen mellom et bølgespektrum og bølgene [9].

Det mest passende spektret avhenger av det geografiske området med lokal batymetri og alvorlighetsgraden av sjøtilstanden. Pierson-Moskowitz (PM)-spekteret og JONSWAP-spekteret er ofte brukt for vindgenerert sjø. PM-spekteret ble originalt foreslått for fullt utviklet sjø. JONSWAP-spekteret forlenger PM-spekteret, for å inkludere «fetch limited seas», som beskriver utviklende sjøtilstander. Begge spektre beskriver vindgenererte bølgetilstander som ofte oppstår for de mest alvorlige sjøtilstandene [11]. Figur 10 illustrerer et PM-spektrum sammenliknet med et JONSWAP-spektrum.



Figur 10: Sammenlikning av Pierson-Moskowitz og høyere «peaked» JONSWAP-spektrum [12]

PM-spekteret $S_{PM}(\omega)$ kan uttrykkes av vinkelfrekvensen ω som

$$S_{PM}(\omega) = \frac{5}{16} \cdot H_s^2 \omega_p^{-5} \cdot \omega^{-5} \exp\left(-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}\right). \quad (6)$$

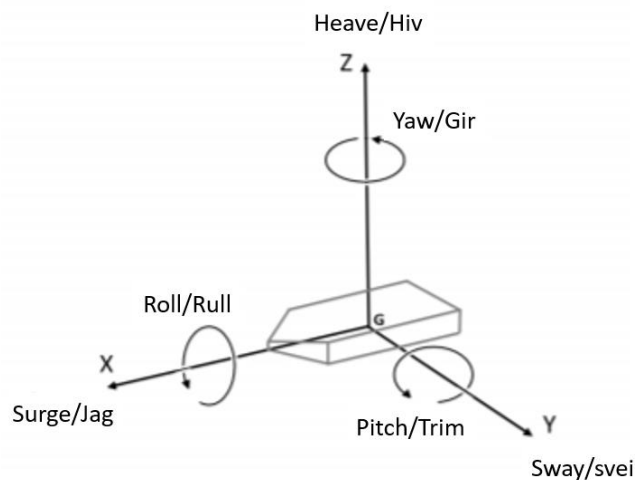
Hvor H_s er den signifikante bølgehøyden, gjennomsnittet av de 1/3 største bølgehøydene og $\omega_p = \frac{2\pi}{T_p}$, hvor T_p er «peak»-perioden. JONSWAP-spekteret $S_J(\omega)$ er en modifikasjon av PM-spekteret for utviklende sjøtilstand i en «fetch limited situation» og kan uttrykkes av vinkelfrekvensen ω som

$$S_J(\omega) = A_\gamma S_{PM}(\omega) \gamma^{\exp\left(-0,5 \left(\frac{\omega - \omega_p}{\sigma \omega_p}\right)^2\right)}. \quad (7)$$

Hvor γ er en dimensjonsløs «peak shape»-parameter, σ er spektralvidde parameter og $A_\gamma = 1 - 0,287 \ln(\gamma)$ er en normaliserende faktor [11].

2.4 Seks grader av frihet

En flytende modell kan ha seks uavhengige bevegelser og kan beskrives som et dynamisk system med seks grader av frihet, ofte uttrykt som 6DOF (6 Degrees Of Freedom). Disse seks frihetsgradene uttrykkes som tre translasjoner og tre rotasjoner i tre retninger. Dette illustreres i Figur 11. Bevegelsene er definert om tyngdepunktet på skipet og rotasjonene om et sett av ortogonale akser gjennom tyngdepunktet, G [12]. De tre translasjonene er beskrevet som «surge», «sway» og «heave», oversatt til norsk, henholdsvis jag, svei og hiv, som henholdsvis er bevegelser om x-, y- og z-aksen. De tre rotasjonene er beskrevet som «roll», «pitch» og «yaw», oversatt til norsk, henholdsvis rull, trim og gir, er rotasjoner henholdsvis om x-, y- og z-aksen.



Figur 11: Seks grader av frihet. Tre translasjoner og tre rotasjoner rundt tyngdepunktet G [14]

2.5 Respons Amplitude Operator

Respons Amplitude Operator (RAO) kan fordeles inn i to definisjoner, Respons Amplitude og Operator. Respons Amplitude refererer til graden av bevegelse en hydrodynamisk, passerende bølge påfører et flytende fartøy, altså den faktiske bevegelsen til fartøyet. Operator refererer til en faktor som må multipliseres med en spesifikk verdi, for eksempel bølgehøyde, for å definere den faktiske bevegelsen. Både bølgehøyde, vanddybde og periode er påvirkende faktorer til et fartøys respons [13].

RAO refererer til bevegelsen av et flytende fartøy i de seks frihetsgradene, hiv, svei, jag, rull, trim og gir, som følge av en hydrodynamisk, passerende bølge. RAO-er brukes som inngangsdata i beregninger for å definere forskyvninger, akselerasjoner og hastigheter på et vilkårlig sted på et marint fartøy. Det brukes igjen til å identifisere hvilke krefter strukturer og/eller utstyr utsettes for.

En RAO kan også refereres til som en respons variabel, eller en kvadrert transfer funksjon. Den kan defineres som forholdet mellom et systems utgangsdata og inngangsdata. Den anvendes for å bestemme hvilken effekt en sjøtilstand vil ha på et fartøys bevegelser gjennom vannet. I frekvensdomenet kan RAO-en beskrives slik

$$|H(\omega)|^2 = \left(\frac{Y(\omega)}{X(\omega)} \right)^2. \quad (8)$$

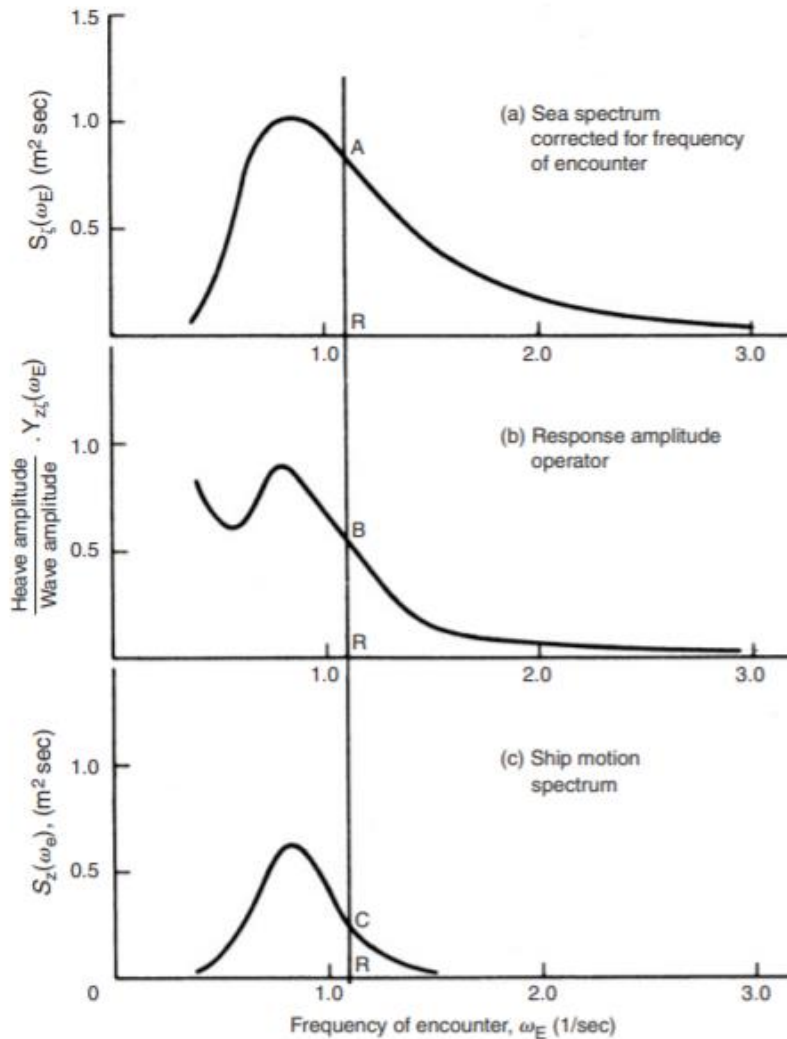
Hvor $H(\omega)$ er transfer funksjonen, der $Y(\omega)$ og $X(\omega)$ henholdsvis er utgangsdata og inngangsdata.

Tilnærming av responsspekteret til et system er en ofte anvendt metode for å estimere korttids respons-statistikk til et system i en gitt sjøtilstand, der systemet er utsatt for bølgelaster i tilfeldig sjø. Responsspekteret kan beskrives som produktet av bølgespekteret og systemets RAO, som vises i Formel (9) [14].

$$S_R(\omega) = S_W(\omega) \cdot |H(\omega)|^2. \quad (9)$$

Hvor $S_R(\omega)$ er responsspekteret og $S_W(\omega)$ er bølgespekteret.

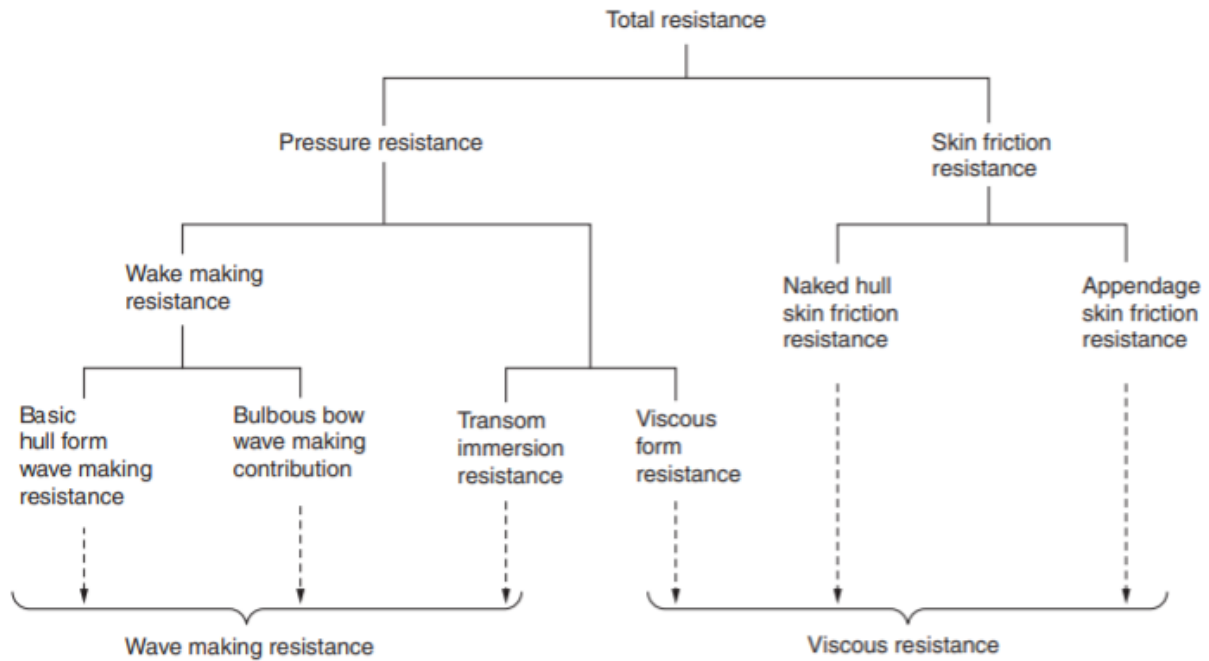
Responsspekteret kan illustreres som i Figur 12, hvor produktet av bølgespekterets verdi i punkt A og verdien av RAO i punkt B gir verdien av responsspekteret i punkt C, for en gitt frekvens [14].



Figur 12: Energispektrere og respons til et skip i irregulær sjøtilstand (illustrert for hiv translasjon) [12]

2.6 Motstand

Et fartøys motstand består av flere komponenter, som kan brytes ned i bidragene som vises i Figur 13. Disse gjelder for tilfeller der et fartøy gjennomgår stødig bevegelse i lav hastighet. Det vil si at skipets vekt balanserer fortregningslegemets oppdrift, uten den signifikante tilførselen av hydrodynamiske løftekrefter. Motstanden kan fordeles inn i to hoveddeler, som er trykk og overflate-friksjonsmotstand, disse kan igjen deles opp i flere diskrete komponenter. Bidragene til disse komponentene kan kategoriseres i bølgedannet og viskøs motstand. I tillegg til disse komponentene, er luftmotstand og tilleggsmotstand til stede i kraftige værforhold, men disse må håndteres separat. Hver av komponentene som representeres i Figur 13 kan studeres separat. Forutsetningen for dette er at det kan dokumenteres for at de vil ha en påvirkning på hverandre [12].

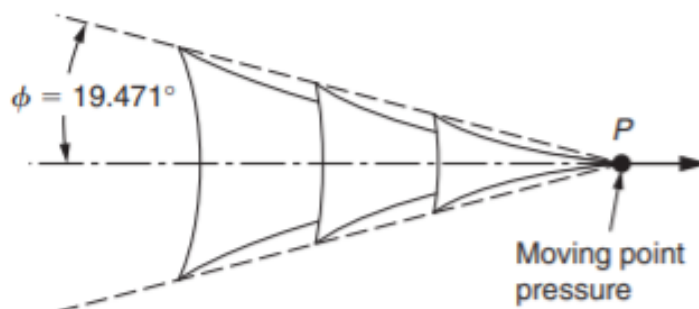


Figur 13: Komponenter i skipsmotstand [12]

2.6.1 Bølgedannet motstand

I 1904 studerte Lord Kelvin problemstillingen av bølgemønsteret som forårsakes av et bevegende trykkpunkt. Han beviste at det resulterende systemet av bølger består av et divergent sett av bølger, sammen med et tverrgående system, omtrent normalt på retningen av bevegelse for det bevegende punktet. Figur 14 viser systemet av bølger som formes. Mønsteret av bølger er forbundet av to rette linjer som i dypt vann er vinkelen ϕ til retningen av bevegelse for punktet, gitt av

$$\phi = \sin^{-1}\left(\frac{1}{3}\right) = 19,471^\circ. \quad (10)$$



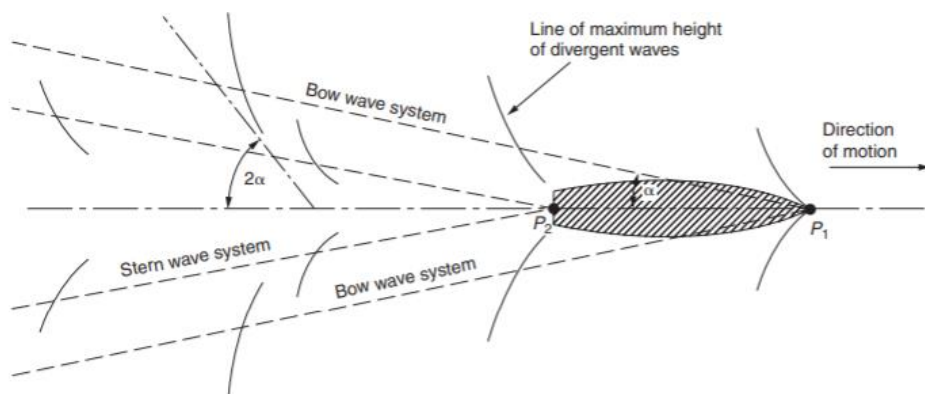
Figur 14: Bølgemønster produsert av et bevegende trykkpunkt i stille vann [12]

Innblandingen mellom divergente og tverrgående systemer, gir den observerte bølgen med sin karakteristiske form. Siden begge systemene beveger seg med samme hastighet, altså fartøyets hastighet, estimeres bølgelengden λ mellom påfølgende bølgetopper som

$$\lambda = \frac{2\pi}{g} V^2. \quad (11)$$

Hvor g er tyngdekraften og V er hastigheten.

Høyden av bølgesystemet som dannes øker relativt hurtig når de spres ut sideveis, ettersom energien bølgene inneholder er konstant og må spres utover en økende, større lengde. Mer energi er absorbert av et tverrgående system, enn av et divergent system. Dette misforholdet øker med økende hastighet. Et trykkpunktfelt plasseres nær baugen, som i Figur 15, da et ekte skip ikke kan representeres tilstrekkelig av et enkelt bevegende trykkpunkt. Med dette kan baugbølgesystemet simuleres, sammen med et bevegende sugefelt nærme hekken for å representere hekkbølgesystemet [12].



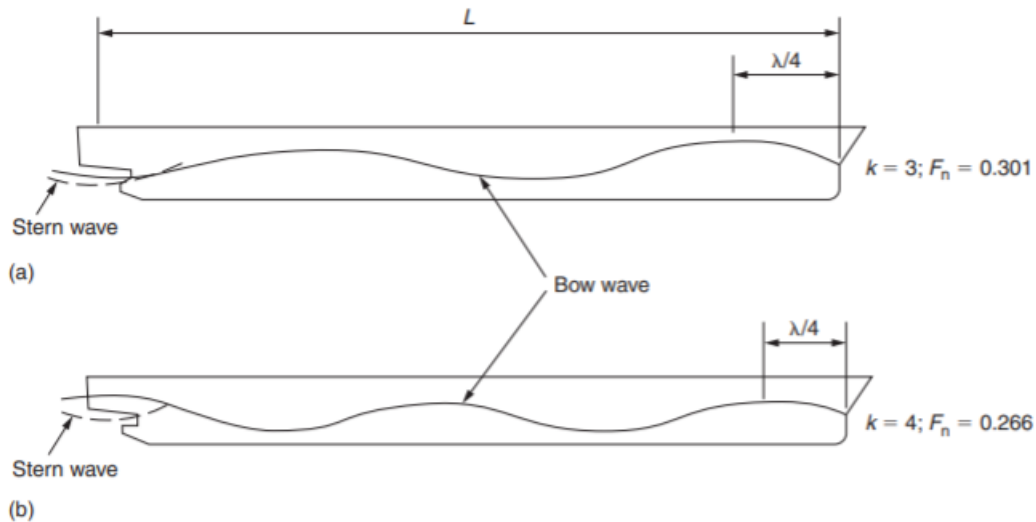
Figur 15: Enkelt skipsbølgemønster representert av to trykkpunkter [12]

I Figur 16 observeres dannelse av bølgetopp omtrent $\frac{\lambda}{4}$ fra baugen, imens sugefeltet introduserer en bølge gjennom hekken, der begge disse bølgesystemet vil ha samme bølgelengde, λ . Figur 16 (a) illustrerer bølgeforsterking ved hekken. For at et slikt tilfelle skal oppstå, må avstanden mellom den første bølgetoppen og hekken være et oddetall av halve bølgelengder. Det kan beregnes på følgende måte

$$L - \frac{\lambda}{4} = k \frac{\lambda}{2}. \quad (12)$$

Hvor L er fartøyets lengde, $k = 1, 3, 5, \dots, (2j + 1)$, med $j = 0, 1, 2, 3, \dots$

Figur 16 (b) illustrerer bølgekansellering ved hekk. For dette konvergente tilfellet, når baug- og hekkbølger kansellerer hverandre, og dermed produserer minimal bølgedannet motstand, må avstanden $L - \frac{\lambda}{4}$ være et partall av halve bølgelengder. Dette kan beregnes på samme måte som i Formel (12), der $k = 2, 4, 6, \dots, 2j$ med $j = 1, 2, 3, \dots$



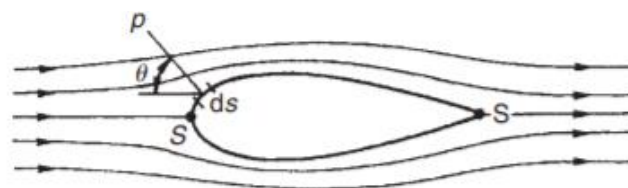
Figur 16: Bølgeforsterkning og kansellering ved hekken: (a) bølgeforsterkning ved hekk og (b) bølgekansellering ved hekk [12]

2.6.2 Viskøs formmotstand

Den totale motstandskraften på et legeme som er nedsenket i en væske og beveger seg i en gitt hastighet, er summen av overflatefriksjonskomponenter. Disse komponentene er lik integralet av skjærspenningen over overflaten av legemet. Det former motstandskraften, som er et integral av kreftene som virker normalt på legemet [12].

I en ikke-viskøs væske er strømmen langs enhver strømlinje bestemt av Bernoullis likning. Strømmen rundt et vilkårlig legeme er dermed forutsigbar, med tanke på endringene mellom trykk og hastighet over overflaten. For tilfellet i Figur 17, fører dette til at netto aksialkraft i bevegelsesretningen er lik null, og på grunn av det to-dimensjonale tilfellet illustrert er

$$\oint p \cos \theta ds = 0. \quad (13)$$

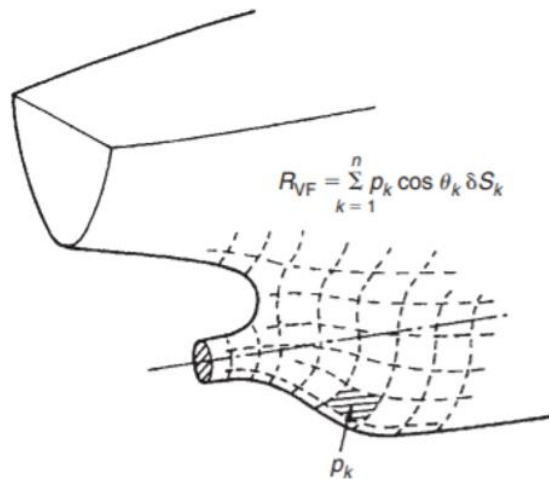


Figur 17: Viskøs formmotstand kalkulerings på ikke-viskøst strømmetilfelle på et vilkårlig legeme [12]

Under bevegelse i en ekte væske, dannes et grensesjikt over overflaten av legemet, som for et skip vil være turbulent og sannsynligvis også separeres på et tidspunkt i etterkant av legemet. Tilstedeværelsen av grensesjiktet og dets vekst langs overflaten på skroget påvirker trykkfordelingen som virker på skroget ut fra potensialet eller det ikke-viskøse tilfellet. Som en konsekvens av dette, kan ikke venstre side av Formel (13) lenger være lik null, og den viskøse form-motstanden R_{VF} defineres for et tredimensjonalt tilfelle for et skipsskrog som

$$R_{VF} = \sum_{k=1}^n p_k \cos \theta_k \delta S_k. \quad (14)$$

Her fordeles skroget i n elementære arealer δS_k og bidraget av hvert normale trykk p_k som virker på arealet er summert i bevegelsesretningen, som vises i Figur 18. Formel (14) er en ekstrem kompleks likning å løse, da den avhenger av løsningen av grensesjiktet over fartøyet. Dette er en løsning som i nåtid bare kan tilnærmes ved å bruke omfattende beregningsressurser for relativt enkle skrogformer. Som en konsekvens av dette, er viskøs formmotstand vanligvis redegjort for ved bruk av empiriske eller pseudoempiriske metoder per i dag [12]. Disse metodene betyr at teori baseres på erfaring av iakttagelser av fenomener og hendelsesforløp, gjerne i form av eksperimenter.



Figur 18: Viskøs formmotstand kalkulerings for trykk som virker på en skallplate på et skip [12].

2.7 Stabilisatorer

For at et fartøy skal bli mer stabilt kan stabilisatorer installeres, for dette finnes det både aktive og passive systemer. Aktive finner er mye brukt blant aktive stabilisatorer, da det sammenliknet med antikrenningstanker og gyroskopsystemer, har den relative fordelingen av lavere kostnad, vekt og plassbehov. På tross av dette er det fortsatt essensielle ulemper med aktiv finne

stabilisatorer. De produserer kun kregedemping under fremdrift, hvilket fører til at fartøyet typisk må være utstyrt med kontinuerlige kjølfinner i tillegg [15].

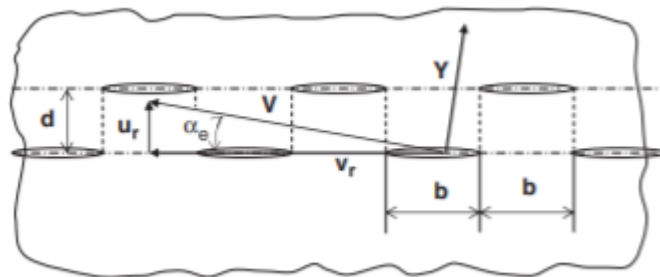
Aktive stabilisatorer, sammenliknet med konstruktive stabilisatorer som ikke har bevegelige deler relativt til skipet, involverer finneinstallasjon. Dette er en komplisert og energikrevende mekanisme. Kontrollsystemet har i tillegg behov for eget vedlikehold. Kostnaden og vekten av dette er svært viktig [15].

Short Wings Roll Stabilizer (SWIRs), eller såkalte fordelte finner, kan forestilles som en finne langsgående skrogbunnen, fordelt i 18-24 like deler, der hver andre del forskyves en tverrgående avstand

$$d = (0,5 - 0,7)b. \quad (15)$$

Der b er finnens bredde.

Med dette oppnås to rader av finner. Dersom finnene har en høyde mellom 0,35 og 0,4 m er finnene lagd av flate plater, men for større høyder bør de ha en hydrofoil-profil. De fordelte finnene produserer nesten lik demping som kontinuerlige finner under null fremdrift. Under fremdrift er finnene strømlinjet med en langsgående hastighet v_r og en tverrgående hastighet u_r som er forårsaket av vinkelhastigheten ϕ til det kregende skipet. Den resulterende hastigheten V danner den effektive angrepsvinkelen α_e med finnen, som illustreres i Figur 19. Ettersom α_e er betraktelig liten, er løftkraften Y omtrent vinkelrett på finnen [15].



Figur 19: Fordelte finner [15]

Installasjon av eksterne kregestabilisatorer øker skipets motstand under fremdrift. Dersom de kontinuerlige finnene samsvarer med vannstrømningen over skroget, er den adderte motstanden tilnærmet utelukkende friksjon. Dette medfører at skipets hastighetsreduksjon i null trim ikke overstiger 1,5-2 % [15].

Tapet i fremdriftshastighet på grunn av ikke-operative finner er 0,3-0,4 %, men motstandskraften øker når finnene er aktive. På tross av dette, ifølge tester med et skip på 1800 tonn, i en hastighet på 19 knop og maksimum helningsvinkel på finnene på 15 grader, var gevinsten i hestekrefter 1,7 %. Denne gevinsten er sammenliknet med skipets krengetninger uten stabilisatorer, med amplituder på omtrent 20 grader [15].

Reduksjon av krengetning forårsaket av aktive finnestabilisatorer avhenger av amplituden for krengetning som skipet har i samme bølger, uten finns operasjon. Reduksjonsfaktoren er 3-4, for amplituder under 10 grader, men ved større amplituder som 18-20 grader er reduksjonen betraktelig lavere med en faktor på 2,5 [15].

Fordelte finner fungerer som en hybrid av kontinuerlige kjølfinner og aktive finner. De skal fungere som kjølfinner under null fremdrift, mens under fremdrift skal de produsere ytterligere demping. Det skjer ved hjelp av løftekrefter, som likner aktive finnestabilisatorer. De fordelte finnenes motstandskraft vil være omtrent det samme som for kontinuerlige kjølfinner, da de har det samme arealet [15].

3 Metoder

Dette kapittelet inneholder metoder for utvikling av eksperimentelle og numeriske modeller, samt metoder for utførelse av eksperimentelle og numeriske analyser. Det første delkapittelet inneholder skaleringsmetode benyttet for å finne geometriske spesifikasjoner på en nedskalert modell av Greenfish sin demodrone. Det neste delkapittelet inneholder metode for design av modeller. Her presenteres programvare, metode for bygging av fysiske modeller, geometriske spesifikasjoner, dimensjonering av stabiliserende effekter og en oversikt over alle modellene som testes. Det tredje delkapittelet presenterer de eksperimentelle metodene, der bruk av testfasiliteter, programvare og eksperimentelle usikkerheter inngår. Det fjerde delkapittelet inneholder numeriske metoder. Her presenteres illustrasjoner og spesifikasjoner av meshete modeller, parametere benyttet i hydrodynamiske analyser, samt numeriske usikkerheter.

3.1 Dimensjonering av nedskalert modell

En forenklet, nedskalert modell av Greenfish sin demodrone utvikles, med en skaleringsfaktor på $\lambda = 2$, for testing i MarinLab ved HVL. Nedskalering er nødvendig, da den relativt korte bredden i bølgetanken skaper begrensninger for modellens lengde, ettersom interaksjon av modellen med bølgetanken kan oppstå. Det er i tillegg hensiktsmessig å skalere ned modellen, slik at sjøtilstander også kan nedskaleres. Skaleringsfaktoren skulle gjerne vært større, da et bredere spekter av testbølger blir mulig. På tross av dette, vil ytterligere nedskalering gi en så liten modell, at det skaper vanskeligheter i maskinerings- og utformingsprosessen, samt usikkerhet i utførelse av eksperimenter. Modellens hoveddimensjoner beregnes som

$$l_M = l_S \cdot \frac{\rho_M}{\rho_S} \cdot \frac{1}{\lambda} = 1500mm \cdot \frac{1000 \frac{kg}{m^3}}{1025 \frac{kg}{m^3}} \cdot \frac{1}{2} = 750mm, \quad (16)$$

$$D_M = D_S \cdot \frac{\rho_M}{\rho_S} \cdot \frac{1}{\lambda} = 180mm \cdot \frac{1000 \frac{kg}{m^3}}{1025 \frac{kg}{m^3}} \cdot \frac{1}{2} = 90mm, \quad (17)$$

$$h_M = h_S \cdot \frac{\rho_M}{\rho_S} \cdot \frac{1}{\lambda} = 240mm \cdot \frac{1000 \frac{kg}{m^3}}{1025 \frac{kg}{m^3}} \cdot \frac{1}{2} = 120mm. \quad (18)$$

Der l er lengde, D er diameter, h er kjølhøyde, ρ er tetthet, indeks S refererer til fullskalastruktur, indeks M refererer til modellen og λ er skaleringsfaktoren. På tross av Froude-skalering, som tilsier at den nedskalerte lengden er 750mm, settes lengden ned til et sted mellom 550 og 600mm. Dette for å unngå at refleksjoner i tankveggene oppstår, forårsaket av bølgetankens relativt lave bredde på tre meter.

Ettersom fullskalastrukturen har en vekt m_S på 23 kg, beregnes modellens vekt m_M med Froude-skalering som i Formel (19).

$$m_M = m_S \cdot \frac{\rho_M}{\rho_S} \cdot \frac{1}{\lambda^3} = 23kg \cdot \frac{1000 \frac{kg}{m^3}}{1025 \frac{kg}{m^3}} \cdot \frac{1}{2^3} = 2,8kg. \quad (19)$$

Videre bestemmes kjølenes vekt, som skal utgjøre 10% av modellens totale vekt, på oppfordring av oppgavegiver (NORCE) og beregnes på følgende måte

$$m_k = m_M \cdot 0,1 = 2,8kg \cdot 0,1 = 0,28kg. \quad (20)$$

Hvor m_k er vekten til kjølen og m_M er modellens totale vekt, inkludert kjølen. Kjølen utformes av en aluminiumsplate og veier 0,03 kg, som betyr at den må utstyres med en tilleggsvekt på 0,25 kg. Den ekstra vekten i kjølen identifiseres som et såkalt «dummy»-ekkolodd, som skal tilsvare et ekkolodds vekt. For å oppnå den ekstra vekten benyttes en Ø30 stålstang, der nødvendig lengde l_{dm} beregnes som

$$l_{dm} = \frac{m_{dm}}{\pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot \rho_{stål}} \rightarrow l_{dm} = \frac{0,25kg}{\pi \cdot \frac{0,03m^2}{4} \cdot 7850 \frac{kg}{m^3}} = 0,045m. \quad (21)$$

Hvor m_{dm} er «dummy»-ekkoloddets vekt og d er diameteren til «dummy»-ekkoloddet. Modellens lettvekt, det vil si modellens vekt, utstyrt med kjøle og finner, utgjør omtrent 0,9 kg. For at modellen skal oppnå ønsket totalvekt på 2,8 kg, må den ballasteres med omtrent 1,9 kg. Ø20 stålstenger velges som ballast og nødvendig lengde l_b beregnes dermed som

$$m_b = A_{\emptyset 20} \cdot l_b \cdot \rho_{stål} \rightarrow l_b = \frac{m_b}{\pi \cdot \frac{d_b^2}{4} \cdot \rho_{stål}} = \frac{1,9kg}{\pi \cdot \frac{0,02m^2}{4} \cdot 7850 \frac{kg}{m^3}} = 0,77m. \quad (22)$$

Hvor m_b er nødvendig ballast, $A_{\emptyset 20}$ er stålstangens tversnittareal og d_b er diameteren til stålstangen. Innvendig plass i modellen er begrenset til 0,25 m. Det er dermed nødvendig med tre Ø20 stålstenger, ettersom $\frac{0,77m}{0,25m} = 3,08 \approx 3$.

3.2 Modelldesign

To såkalte hovedmodeller utvikles, der den ene modellen representerer en forenklet 1:2 modell av Greenfish sin demodrone. Den andre modellen, er en modifisert, nedskalert modell av demodronen. Denne modellen utstyres med fordelte finner, har en konvensjonell utformet «spoon»-baug og spisset hekk. Alle bauger og hekker skal være avtakbare, slik at flere kombinasjoner av baug-, hekk- og finnegeometri kan settes sammen.

3.2.1 Modelldesign i Autodesk Inventor

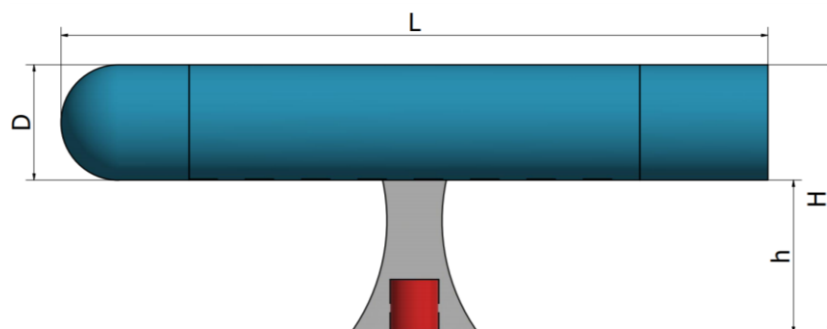
Autodesk Inventor er en mekanisk design- og 3D CAD programvare, som brukes til mekanisk- og produktdesign [18]. Gjennom eksportering av tegninger til DWG-filer, kan tilsvarende utforminger freses ut i en CNC-maskin. Ved eksportering av plategeometrier til DXF-filer kan tilsvarende geometrier kuttet ut i en vannskjærer. Ved eksportering av modeller til SAT-filer kan modellene importeres i GeniE for forberedelse til numeriske simuleringer.

3.2.2 Geometriske spesifikasjoner

Skrogformen til modellene er hovedsakelig bygd av Divinucell H60, deretter overflatebehandlet med sparkel og maling. De fordelte finnene og kjølene er skjært ut i aluminium. I kjølen plasseres et «dummy»-ekkolodd for å tilsvare et ekkolodds vekt, bestående av en kappet stålstang. Modellene er også ballastert med stålstenger på innsiden av skroget for å oppnå ønsket vekt. Vekten beholdes konstant for begge modellene. Det medfører at den modifiserte modellen vil ligge noe dypere i vannet, da den har mindre oppdrift, som følge av at den har mindre volum. Modellene består av tre deler, baug, midtseksjon og hekk. Baugen og hekken tres inn i midtseksjonen og festes med fug og teip. For bytting av deler fjernes teipen og fugen kuttet av. Hoveddimensjoner på den nedskalerte modellen av Greenfish sin demodrone vises i Tabell 2 og illustreres i Figur 20. Loddrette streker på skroget beskriver hvor de tre ulike delene er satt sammen. Følgelig kan disse tre delene demonteres.

Tabell 2: Hoveddimensjoner på den nedskalerte modellen av demodronen

Del	Dimensjon	Enhet
Diameter (D)	90	mm
Lengde (L)	552	mm
Høyde fra kjøll til topp (H)	210	mm
Høyde på kjøll (h)	120	mm
Vekt	2,8	kg

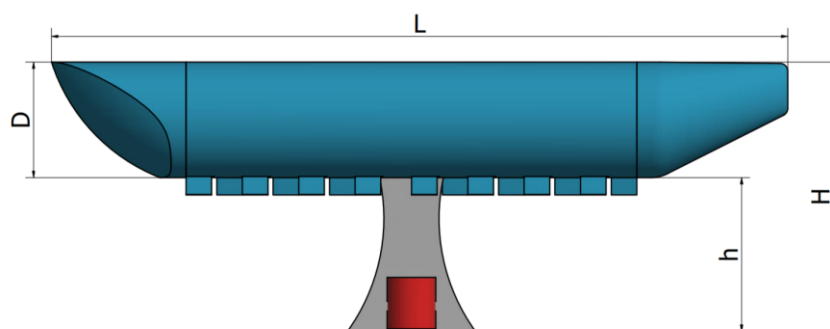


Figur 20: Oversikt over hoveddimensjoner på den nedskalerte modellen av demodronen

Hoveddimensjoner på den nedskalerte modellen av Greenfish sin demodrone, tilført stabiliserende effekter, konvensjonell baug og spisset hekk vises i Tabell 3. Følgelig illustreres den i Figur 21. Dimensjoner på de fordelte finnene vises i Tabell 4, og et detaljbilde av finnene med oversikt over tilhørende hoveddimensjoner vises i Figur 22.

Tabell 3: Hoveddimensjoner på den modifiserte nedskalerte modellen av demodronen

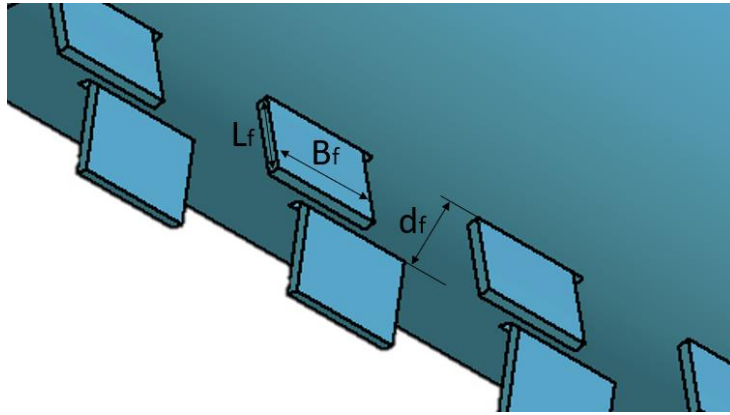
Del	Dimensjon	Enhet
Diameter (D)	90	mm
Lengde (L)	575	mm
Høyde fra kjøllinje til topp (H)	210	mm
Høyde på kjøllinje (h)	120	mm
Vekt	2,8	kg



Figur 21: Oversikt over hoveddimensjoner på den modifiserte nedskalerte modellen av demodronen

Tabell 4: Dimensjoner på fordelte finner

Del	Dimensjon	Enhet
Bredde (B_f)	20	mm
Lengde (L_f)	15	mm
Tverrgående avstand (d_f)	14	mm



Figur 22: Oversikt over dimensjoner på fordelte finner

3.2.3 Dimensjonering av fordelte finner

Den modifiserte nedskalerte modellen av demodronen er utstyrt med såkalte fordelte finner. De kan beskrives som langsgående finner, fordelt i 18-24 like deler, der annenhver del er forskjøvet med en viss tverrgående avstand [15]. På grunn av begrensninger i utforming av relativt små finner og modellens relativt korte lengde, ble 16 finner bestemt for dette tilfellet. Finnenes bredde kan dermed beregnes som

$$B_f = \frac{l_{red}}{16} = \frac{352mm}{16} = 22mm. \quad (23)$$

Hvor B_f er finnens bredde, l_{red} er modellens lengde langs skrogbunnen.

Videre beregnes finnens lengde som

$$\frac{B_f}{2} \cdot L_f < \frac{B_f}{1,3} = \frac{22mm}{2} < L_f < \frac{22mm}{1,3} = 11mm < L_f < 16,9mm. \quad (24)$$

Hvor B_f er finnens bredde og L_f er finnens lengde, velges som 15mm.

Finnens tverrgående avstand beregnes som








$$B_f \cdot 0,5 < d_f < B_f \cdot 0,7 = 22mm \cdot 0,5 < d_f < 22mm \cdot 0,7 = 11mm < d_f < 15,4m. \quad (25)$$

Hvor B_f er finnens bredde og d_f er den tverrgående avstanden mellom finnene, og velges som 14mm.

3.2.4 Oversikt over modeller

En oversikt over alle modellene vises i Tabell 5, der Modell 2 er den forenklete, nedskalerte modellen av demodronen. Modell 1 er den modifiserte, nedskalerte modellen av demodronen. Modell 3 er lik Modell 2, bortsett fra at den runde baugen er erstattet med den konvensjonelle baugen. Modell 4 er også lik Modell 2, bortsett fra at den runde baugen er erstattet med den spissede hekken som baug. Modell 5 tilsvare Modell 2, tilført fordelte finner. Modell 6 tilsvare Modell 1 uten fordelte finner og er i tillegg reversert. Det vil si at den konvensjonelle baugen brukes som hekk, og den spissede hekken brukes som baug. Modell 7 tilsvare Modell 4, tilført fordelte finner.

Tabell 5: Oversikt over alle modeller

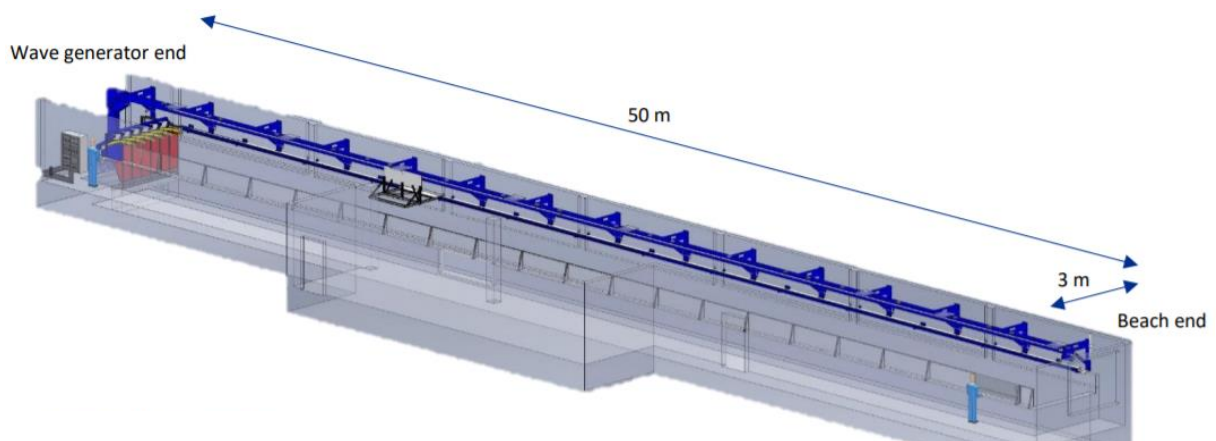
Navn	Bilde (←Baug/Hekk→)	Forklaring
Modell 1		Konvensjonell baug, spisset hekk + fordelte finner
Modell 2		Rund baug, flat hekk
Modell 3		Konvensjonell baug, flat hekk
Modell 4		Spisset hekk som baug, flat hekk
Modell 5		Rund baug, flat hekk + fordelte finner
Modell 6		Spisset hekk som baug, konvensjonell baug som hekk
Modell 7		Spisset hekk som baug + fordelte finner

3.3 Eksperimentelle metoder

Tre modellkombinasjoner testes i bølger, for å måle respons i hiv, trim og rull i forskjellige bølgetilstander. Testkjøringene utføres i MarinLab, der en bølgegenerator fra Edinburgh Designs er installert i den ene enden av tanken. Resistensbaserte bølgehøydemålere fra Edinburgh Designs benyttes for å måle bølgedata. Fire synkroniserte Qualisys Oqus 500 kameraer brukes for å måle testobjektets respons. Syv testobjekter testes under sleping, for å måle motstand i forskjellige hastigheter. Testkjøringene utføres i MarinLab, der testobjektene forankres til en slepevogn, levert av Edinburgh Designs. Mellom testobjektet og slepevognen installeres en lastcelle [16].

3.3.1 MarinLab

MarinLab er et hydrodynamisk forskningsanlegg, lokalisert på Høgskulen på Vestlandet, campus Bergen. Anlegget i Figur 23 viser en 3x2,2 meter tankseksjon av 50 meters lengde, som er utstyrt med slepevogn og bølgegenerator. Denne kan brukes til modellskalatesting av skip, offshorestrukturer, flytende plattformer, fortøyningsystemer, marine energienheter, undervanns- og autonome kjøretøy og hydrodynamiske interaksjoner. Væsken som benyttes er ferskvann med en temperatur mellom 6 og 14 °C, avhengig av hvor lang tid det har gått siden vannet ble byttet ut. Væsken har dermed en tetthet på omtrent 1000 kg/m³.



Figur 23: Oversikt over MarinLab [16]

Bølgegeneratoren kan generere bølger av maksimal bølgehøyde på 0,5 meter og bølgeperiode på nesten to sekunder. Generatoren er levert av Edinburgh Designs. Den består av seks hengslete bølgeårer som styres av et kontrollsystem som har evne til å dempe ut uønskede bølgerrefleksjoner fra tankveggene. På motsatt side av bølgegeneratoren er tanken utstyrt med en porøs passiv strand. Stranden har en eksponentiell profil, for å tillate brytende bølger å bli

absorbert med minimale refleksjoner. Ytterligere er MarinLab utstyrt med bølgehøydemålere, et Qualiys kamerasystem som tar opp bevegelser og datamaskiner for å operere systemene [16].

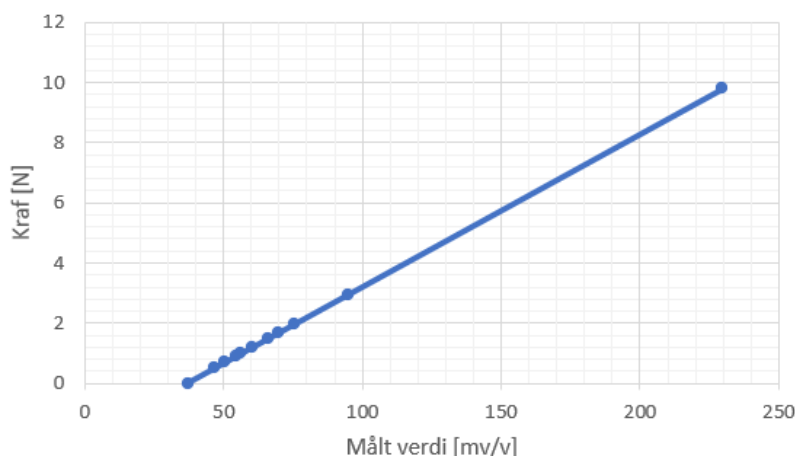
3.3.2 Slepevogn

En programvare, Towing Carriage, brukes til å operere slepevognen, levert av Edinburgh Designs. Start- og sluttposisjon kan defineres, samt hastighet og akselerasjon. Akselerasjonens oppførsel kan også defineres, om den skal ha en lineær oppførsel, eller mer eksponentiell, som gir en slakere akselerasjonskurve [19].

3.3.3 Motstandsmåling

For at motstanden til testobjektet skal måles under sleping, utstyres slepevognen med en lastcelle. Det er en type transducer. Den oversetter kraft til et elektrisk signal som kan måles. Det elektriske signalet endres parallelt med kraften cellen utsettes for. Et tau festes direkte fra lastcellen til et forankringspunkt på testobjektet. På denne måten måler lastcellen modellens motstand under fremdrift.

Lastcellen kalibreres før den tas i bruk for redegjørelse av hvilket elektrisk signal som tilsvarer null kraftbelastning og hvordan det elektriske signalet stiger med økende kraftbelastning. Kalibrerte, kjente vekter påsettes lastcellen for å undersøke hvilket elektrisk signal det tilsvarer. For å avdekke eventuelle avvik repeteres kalibreringsprosessen for noen signaler. Signalet avleses i LabVIEW. Det er en programvare for datainnsamling og maskinvarekontroll, som brukes til å samle inn målt data fra eksperimenter [21]. En lineær funksjon dannes ved å lage en graf som går tilnærmet gjennom alle målingene. Dette illustreres i Figur 24, der y- og x-aksen henholdsvis representerer påsatt kraft og elektrisk signal. Denne funksjonen implementeres i LabVIEW, slik at kraftbelastningen på cellen kan avleses direkte i Newton.



Figur 24: Kalibrering av lastcelle

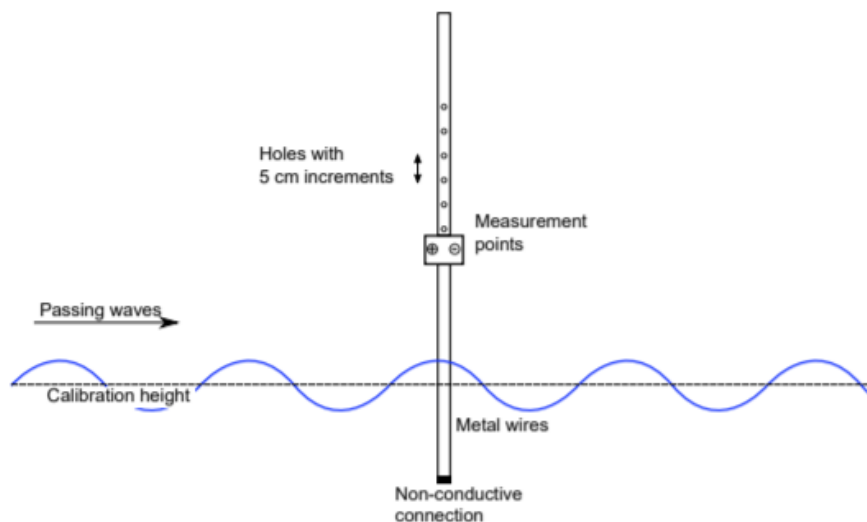
3.3.4 Bølgegenerator

Edinburgh Designs har utviklet programvareverktøy spesifikt for å kjøre eksperimenter i en bølgetank. Bølgegeneratorprogramvaren består av to prinsipielle komponenter: Wave Synthesiser og Wave Runtime. Wave Synthesiser tillater brukeren å spesifisere bølger som skal brukes i et eksperiment. Programvaren gir så bølgenes utgangsdata i et åpent XML-basert format. Dette er optimalisert for å lastes inn i Edinburgh Designs' Wave Runtime, derfra kan de spesifiserte bølgene kjøres i en bølgetank [19].

3.3.5 Bølgehøydemåler

Bølgehøyden og -perioden bølgeårene skal generere, er ikke nødvendigvis tilsvarende den faktiske bølgen som kjøres. Det er derfor essensielt at tanken utstyres med bølgehøydemålere for å redegjøre hvilken bølge som testobjektet faktisk utsettes for.

En bølgehøydemåler kan sees i Figur 25, der den målte motstanden mellom ledningene virker proporsjonalt med nedsenkningsdybde. En gradert stang på toppen brukes til å kalibrere bølgehøydemåleren med to kjente posisjoner rundt kalibreringshøyden [23]. Prøvehastigheten settes til 128 Hz.

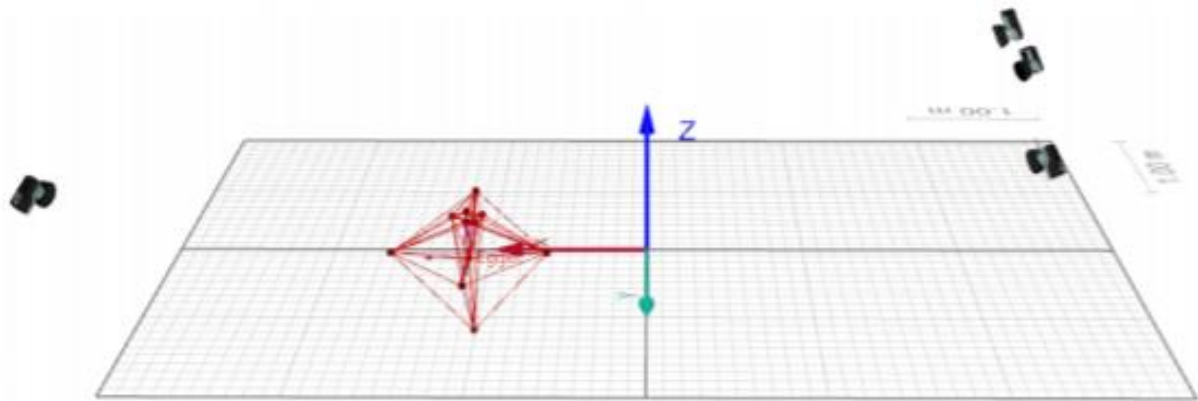


Figur 25: Bølgehøydemåler [23]

3.3.6 Bevegelsesanalyse

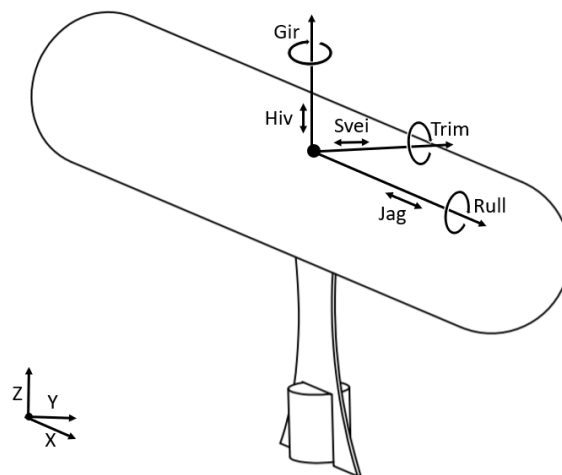
Qualisys er et kamerasystem som fanger opp bevegelser og posisjoner av et objekt i tre dimensjoner. Optisk sporingsteknologi gjør det mulig å måle posisjonen av et hurtigbevegende objekt. Systemet består av kameraer som fanger opp bevegelse, reflektorer og programvare som

tillater opptak i seks grader av frihet [20]. En oversikt over et vilkårlig systems oppsett og arbeidsområde i Qualisys Track Manager vises i Figur 26.



Figur 26: Oversikt over et vilkårlig systems oppsett og arbeidsområde i Qualisys Track Manager [23]

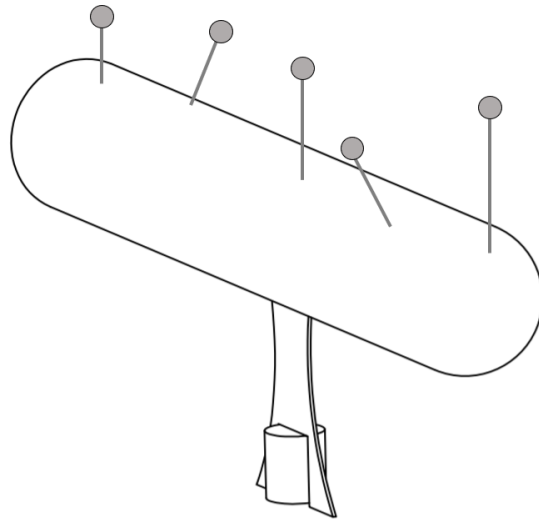
Qualisys tar opp posisjoner av et sett med reflekterende markører på testobjektet, relativt til et kalibrert globalt koordinatsystem. Prøvehastigheten settes til 50Hz. Utgangsfilene inneholder den relative bevegelsen og rotasjonen for hver akse i det lokale koordinatsystemet. Dette gjør det enklere å separere data under postprosessering. Gradene av frihet defineres som i Figur 27.



Figur 27: Fartøyets seks grader av frihet

Kameraene orienteres rundt testområdet og sporer fem reflekterende markører, derav tre markører posisjoneres langs modellens x-akse i forskjellige høyder. To markører plasseres med tilfeldig avstand langs y-aksen i forskjellige høyder, som illustreres i Figur 28. Målingene i de forskjellige referansepunktene vil produsere forskjellige RAO-er, da roterende bevegelse øker translasjonen av modellen. En kropp opprettes i Qualisys Track Manager, som trekkes gjennom

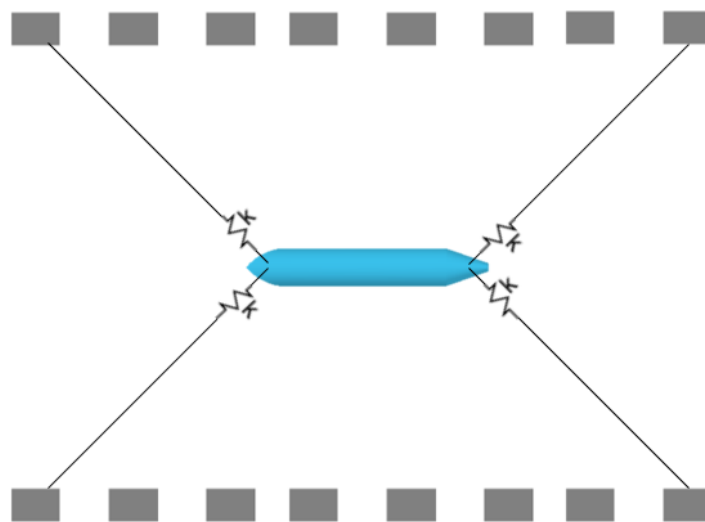
alle punktene der de reflekterende markørene er plassert. Koordinatsystemet til kroppen som dannes bearbejdes deretter, slik at det tilnærmet ligger i flotasjonscenteret.



Figur 28: Fordeling av reflekterende markører på modellen

3.3.7 Fortøyningsoppsett

Et fortøyningsoppsett opprettes for at modellen skal forbli i synsvidden til kamerasystemet. Det er ønskelig med en forankring som har minimal påvirkning på testobjektets translasjoner og rotasjoner. Testobjektet har to forankringspunkter, et på baugen og et på hekken, der tau strekkes til begge sider av tanken med en vinkel på omtrent 45 grader. Det er også påført fjærer i hvert tau, relativt nær forankringspunktene på modellen. Dette illustreres i skissen av fortøyningsoppsettet i Figur 29. Fjærene installeres for å dempe potensielle kraftoverføringer fra modellen til tauet, for å unngå at det gir store utslag på modellens bevegelse.



Figur 29: Skisse av fortøyningsoppsett

3.3.8 Databehandling

MATLAB er en programmeringsplattform som brukes til beregninger og plotting av funksjoner fra målt data i eksperimenter [22]. Utgangsdata fra testkjøringer importeres som tekstfiler i MATLAB. Innledningsvis observeres målingene, og eventuelle støykilder filtreres bort. Dette gjelder for eksempel der tydelig inkonsistens i en måling observeres. Bølgedata og responsdata post-prosesseres for å finne RAO-er. For å finne bølgespektre og responspektre benyttes «pwelch»-funksjon henholdsvis på bølgedata og responsdata. RAO-en er kvadratroten av responspektret dividert på det tilhørende bølgespektret. Motstandsdataen importeres i MATLAB, der akselerasjon og nedbremsingen fjernes fra målingene. Dette for å finne motstandsmålingen for oppnådd testhastighet, der snittmotstanden defineres som motstanden i testkjøringen.

3.3.9 Eksperimentelle usikkerheter og mulige feilkilder

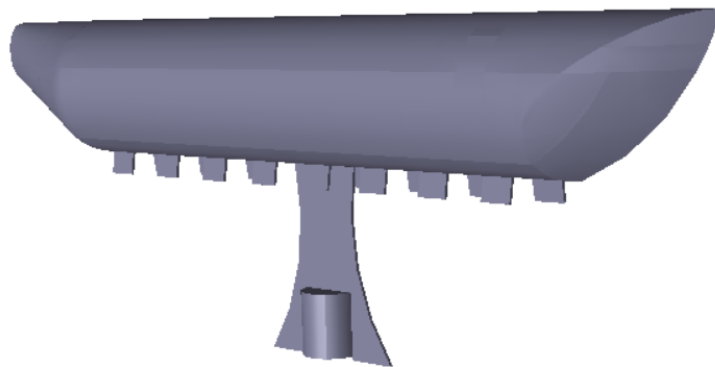
- Utføring av eksperimenter medfører noen usikkerheter. Påføring av reflekterende markører på modellene kan føre til påvirkning av treghetsmoment, ettersom markørene plasseres omtrent 15 centimeter over flotasjonssenteret. Dessuten kan pinnene, som forankrer markørene til skroget, føre til noe ekstra vekt i treghetsmomentberegningen.
- Avstanden fra den dannede kroppen i Qualisys, som går gjennom de reflekterende markørene til vannlinjen, estimeres på øyemål. Dette gir noe usikkerhet i plasseringen av flotasjonssenteret, som responsen beregnes i referanse til.
- Prøvehastigheten i Qualisys settes til 50Hz, da programvaren repeterende krasjer i testkjøringer med større prøvehastighet. Det kan føre til mindre nøyaktige målinger.
- Det er ikke ønskelig at fortøyningsoppsettet resonerer med bølgeperioden. Dessuten blir ikke fortøyningsoppsettets egenfrekvens redegjort for eller målt, noe som gjør det uvisst hvorvidt dette er tilfellet under testkjøring med bølger.
- Forankringspunktet mellom slepevognen og testobjektet har en fastspent posisjon. Dette kan føre til begrensning i modellens naturlige posisjonering i vertikal retning.
- Angrepsvinkelen bølgene treffer modellen med holdes ikke konstant under testing. Det må derfor tas høyde for at opprinnelig posisjonering av modellene, før bølgene kjøres, ikke opprettholdes fullstendig under testkjøring.
- Forekomst av veggeffekter, refleksjoner av bølger i tankveggene grunnet bølgetankens relativt smale bredde på tre meter, kan forventes under testkjøring i bølger. Dette kan bidra til økning av responsen til modellen.

3.4 Numeriske metoder

SESAM er en offshore, strukturell ingeniørprogramvare utviklet av DNV-GL, og brukes for design, optimalisering, simuleringer og analyser av forskjellige offshore-konstruksjoner og -operasjoner. Programvaren består av flere delprogrammer som brukes til forskjellige analyser. Modellering, meshing og validering av struktur utføres i GeniE. HydroD brukes for hydrostatiske og hydrodynamiske analyser, der Wadam brukes for bølgelaster i frekvensdomenet. Postresp brukes videre for postprosessering og presentering av statistisk respons [17]. Numeriske modeller og analyser skal tilsvare eksperimentelle testkjøringer av modeller i bølger.

3.4.1 Modelldesign og meshing

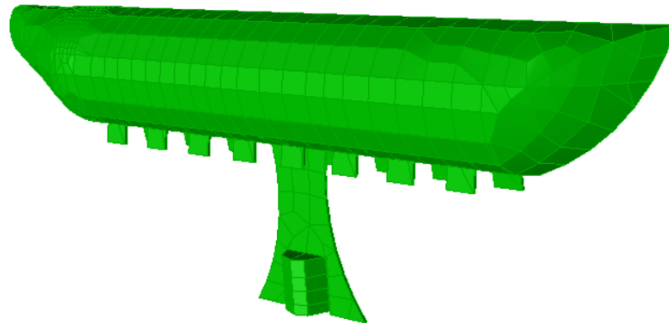
De samme 3D-tegningene som brukes til utforming av eksperimentelle modeller, eksporteres som SAT-filer og importeres i GeniE. Figur 30 viser hvordan dette ser ut for Modell 1. I GeniE må modellene flyttes og roteres relativt til koordinatsystemet, slik at origo ligger i midten av bunnen av kjølen. Det er også nødvendig å danne meshete modeller, da HydroD krever slike modeller for utførelse av hydrostatiske og hydrodynamiske analyser. Et mesh er en samling av overflatelementer som definerer en tredimensjonal form. Før et tilstrekkelig mesh kan opprettes, må strukturen oppdeles i flere elementer.



Figur 30: Modell 1 i GeniE

Dersom meshet er for fint, kan testkjøringer og analyser være svært tidkrevende. På grunnlag av dette brukes hovedsakelig en meshtetthet på 0,02 m. Imidlertid kan det være hensiktsmessig at enkelte områder på modellene benytter en finere meshtetthet på 0,001 m. Dette gjelder spesielt detaljerte, mindre utforminger, for eksempel ytterst på baug eller hekk. Meshete modeller opprettes for modellene som testes i bølger, på MarinLab.

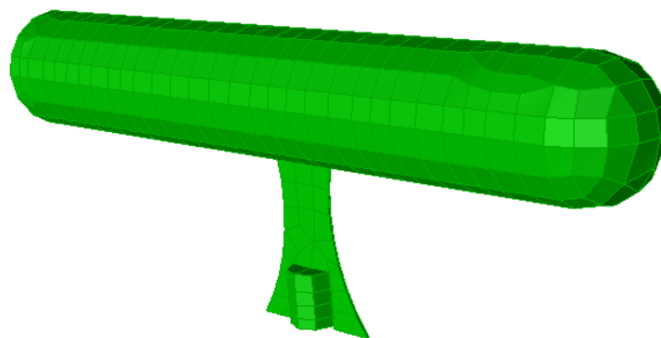
Meshet modell av Modell 1, Modell 2 og Modell 7 vises henholdsvis i Figur 31, Figur 32 og Figur 33. Egenskaper til de meshete modellene av Modell 1, Modell 2 og Modell 7 vises henholdsvis i Tabell 6, Tabell 7 og Tabell 8.



Figur 31: Meshet numerisk modell til Modell 1

Tabell 6: Mesh-egenskaper til Modell 1

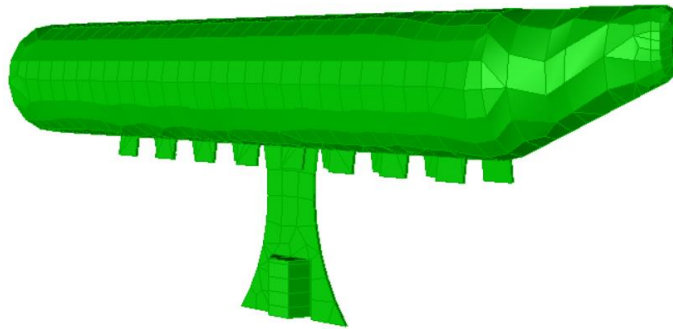
Egenskap	Verdi
Antall noder	1105
Antall elementer	1191
Antall trekant elementer	172
Antall firkantede elementer	1019



Figur 32: Meshet numerisk modell til Modell 2

Tabell 7: Mesh-egenskaper til Modell 2

Egenskap	Verdi
Antall noder	684
Antall elementer	719
Antall trekant elementer	68
Antall firkantede elementer	651



Figur 33: Meshet numerisk modell til Modell 7

Tabell 8: Mesh-egenskaper til Modell 7

Egenskap	Verdi
Antall noder	1164
Antall elementer	1272
Antall trekant elementer	229
Antall firkantede elementer	1043

3.4.2 Hydrodynamisk analyse

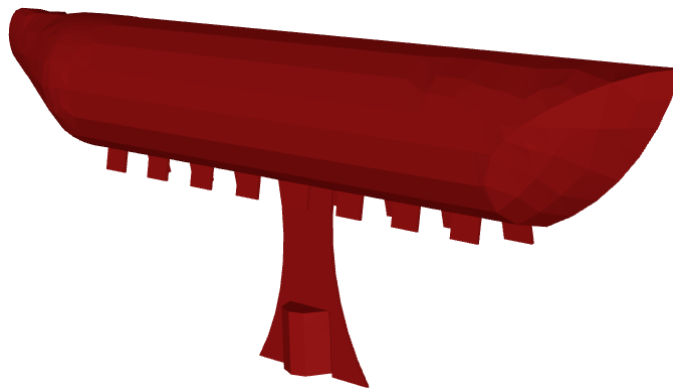
HydroD (D5.3-01), kombinert med WADAM brukes til beregning av numeriske responsvariabler til meshete modeller. Den numeriske RAO-en som hentes i Postresp er unik for modellen i hver frekvens, i hver enkel angrepsvinkel, og vil ikke endres i forskjellige bølgespektre. For gunstig sammenlikning av eksperimentelle og numeriske responspektre, beregnes numeriske responspektre basert på eksperimentelle bølgespektre. De fysiske modellene testes i bølger med angrepsvinkel på 0 og 22 grader. De fysiske modellene er ikke tilstrekkelig fastspente til angrepsvinklene som er satt før testkjøring. For at de numeriske analysene skal møte dette, settes angrepsvinkelen til 5 grader for sammenlikning med eksperimentelle resultater i 0 grader angrepsvinkel. Vinklene angitt i testdomenet er dermed 5 og 22 grader. Analysene kjøres hovedsakelig i et frekvenssett med 0,02 s steglengde, men tilpasses til mindre steglengder i større responser, slik at alle toppverdier inkluderes.

Standardverdier for miljøet beholdes, bortsett fra at væskens tetthet settes til 1000 kg/m^3 og vanddybden til 2,2 m. Den antatte massemodellen består av fire bidrag; kjølen, «dummy»-ekkolodd, skroget og ballast i skroget. Oversikt over disse bidragene med tilhørende masseverdi, vises i Tabell 9. Denne er lik for alle modellene, men tyngdepunktet til skroget og ballasten er noe varierende. Skrogets tyngdepunkt varierer på grunn av forskjellige utforminger av modellene. Ballastens tyngdepunkt varierer, da det er noe høyere langs z-aksen for modellene som utstyres med finner. Dette kommer av at finnene krevet noe plass innover i skroget, som medfører at ballasten må plasseres over finnene.

Tabell 9: Oversikt over bidrag til massemodell

Bidrag til massemodell	Verdi	Enhet
Skrog	0,87	kg
Kjøøl	0,03	kg
«Dummy»-ekkolodd	0,25	kg
Ballast	1,65	kg
Sum	2,80	kg

Panelmodellen som benyttes for Modell 1 vises i Figur 34. Den tilhørende antatte massemodellen vises i Tabell 10. Her står det at tyngdepunktet langs x-aksen er på den negative siden av origo. Den fysiske modellen utstyres med et ekstra lodd i enden av hekken for at trimvinkelen skal bli lik null. For at den numeriske modellen skal samsvare med dette, forflyttes massemodellens tyngdepunkt en nødvendig lengde langs x-aksen. Dette slik at modellens opprinnelige trimvinkel er tilnærmet lik null grader.

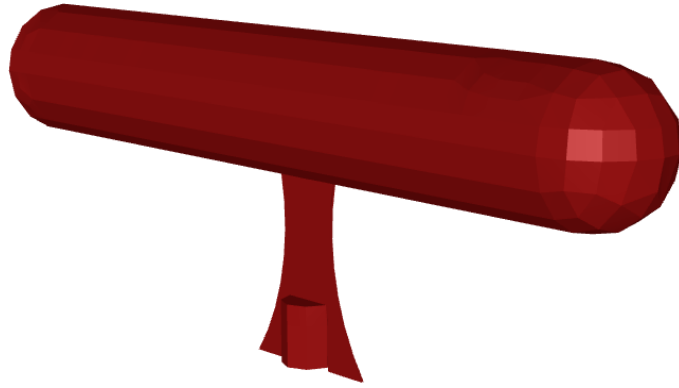


Figur 34: Meshet panelmodell til Modell 1 i HydroD

Tabell 10: Antatt massemodell til Modell 1

Egenskap	Verdi	Enhet
Vekt	2,8	kg
Tyngdepunkt	(-0.0138, 0, 0.145)	m
Radius of gyration	(0.151, 0.151, 0.0159)	m
Specific product of inertia	(0, -0.0467, 0)	m

Panelmodellen som benyttes for Modell 2 vises i Figur 35. Den tilhørende antatte massemodellen vises i Tabell 11. Sammenliknet med Modell 1 sin massemodell har denne noe lavere tyngdepunkt langs z-aksen. Grunnen til dette er at det ikke er installert finner på denne modellen, og ballasten kan derfor plasseres i bunnen av skroget.

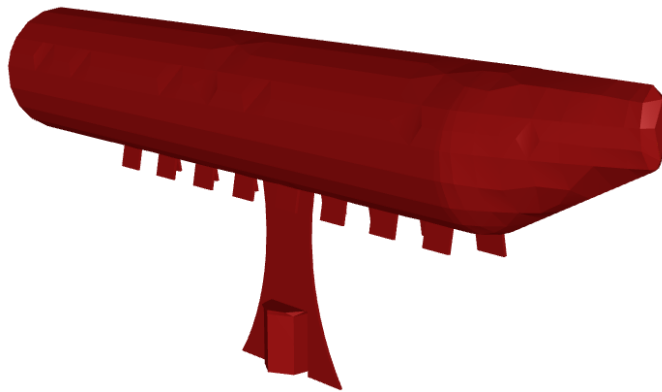


Figur 35: Meshet panelmodell til Modell 2 i HydroD

Tabell 11: Antatt massemodell til Modell 2

Egenskap	Verdi	Enhet
Vekt	2,8	kg
Tyngdepunkt	(-0.00737, 0, 0.143)	m
Radius of gyration	(0.149, 0.149, 0.00960)	m
Spesific product of inertia	(0, 0.0334, 0)	m

Panelmodellen som benyttes for Modell 7 vises i Figur 36. Den tilhørende antatte massemodellen vises i Tabell 12. Denne massemodellen har noe høyere tyngdepunkt langs z-aksen enn Modell 2, da ballasten må plasseres over finnene.



Figur 36: Meshet panelmodell til Modell 7 i HydroD

Tabell 12: Antatt massemodell til Modell 7

Egenskap	Verdi	Enhet
Vekt	2,8	kg
Tyngdepunkt	(-0.023, 0, 0.145)	m
Radius of gyration	(0.150, 0.152, 0.0252)	m
Spesific product of inertia	(0, 0.0609, 0)	m

3.4.3 Postprosessering

Resultatene fra de hydrodynamiske analysene presenteres og hentes i Postresp. Responsvariabler, altså RAO-er i de forskjellige frihetsgradene, i angitte angrepsvinkler kan fremstilles og eksporteres. For å sammenlikne resultatene med andre numeriske analyser, samt eksperimentelle analyser, kopieres eksporterte RAO-er inn i txt-filer. Følgelig importeres de MATLAB for fremstilling og postprosessering av resultater.

3.4.4 Numeriske usikkerheter og mulige feilkilder

- Overflatebehandling av de fysiske modellene, i form av sparkel, medfører antakeligvis tykkere vegg på modellene, derav større volum og oppdrift. Det tas ikke høyde for dette i de numeriske modellene.
- De eksperimentelle modellene utstyres med reflekterende markører, forankret til modellen med pinner. Det er mulig at dette bidrar til noe ekstra vekt og/eller treghetsmoment på modellene. Dette kan skape et avvik fra de numeriske modellene.
- I eksperimentelle testkjøringer forekommer det noe avvik i den opprinnelig innstilte angrepsvinkelen på modellen under kjøring. For å delvis løse dette, settes angrepsvinkelen til 5 grader, i stedet for 0 grader i de numeriske analysene. Angrepsvinkelen er satt til 22 grader i de numeriske analysene, for å sammenlikne med de eksperimentelle analysene i tilsvarende angrepsvinkel. De numeriske analysene har konstant angrepsvinkel og følgelig kan ikke møte variasjon i angrepsvinkel, som er til stede i eksperimentelle analyser. Dette avviket mellom analysene gjør at usikkerheter er til stede.
- De fysiske modellene forankres til et fortøyningsoppsett under testing, mens de numeriske modellene beveger seg fritt i alle frihetsgrader i utførelse av analyser. Det er sannsynlig at dette bidrar til avvik i resultatene.
- Numeriske analyser utledes gjennom lineær bølgeteori og potensialstrømning, som bygges på forenklinger, der friksjon blant annet ikke tas hensyn til. Det må dermed forventes at den numeriske tilnærmingen ikke gjenspeiler teorien fullstendig.

4 Resultater og diskusjon

Dette kapittelet inneholder eksperimentelle og numeriske resultater, samt diskusjon rundt disse resultatene. Første delkapittel presenterer hydrodynamisk motstand, målt under testkjøring med slepevogn, med oversikt over hastigheter og testobjekter. I neste delkapittel sammenliknes den målte motstanden til modeller som har estimert lik bølgedannet motstand. Følgelig illustreres og rangeres estimert bølgedannet motstand, som sammenliknes med målt motstand. Tredje delkapittelet inneholder bølgekalibrering av bølgedata, der bølgedata presenteres, og passende bølgespektrum tilnærmes. Fjerde delkapittel presenterer responsdata fra Qualisys Track Manager, der responsstatistikken til de forskjellige modellene presenteres. Femte delkapittel sammenlikner eksperimentelle RAO-er, tilhørende forskjellige modeller, i like bølgespektre. Følgelig sammenliknes en modell sine målte RAO-er i tre forskjellige bølgespektre. Sjettede delkapittel sammenlikner de eksperimentelle RAO-ene, med de numeriske. Siste delkapittel presenterer numerisk RAO i lavere frekvenser, som ikke er representative i de eksperimentelle resultatene. Dette for å sammenlikne med responsstatistikken til *Sailbuoy* under feltprøver i kraftig sjø.

4.1 Hydrodynamisk motstand

Syv forskjellige modeller testes for hydrodynamisk motstand under testkjøring med slepevogn. Hver modell testes i ti forskjellige hastigheter. Resultatene til modellene fremstilles grafisk og rangeres etter størst motstand i lave, middels og høye hastigheter.















Modellene testes i hastigheter som samsvarer med hastigheter for fullskalastrukturen. Det vil si hastigheter fra 0,5 til 4,5 knop. Tabell 13 viser hva dette tilsvarer i meter per sekund for fullskalastrukturen. Følgende beskrives de nedskalerte hastighetene til modellen, med en faktor på to. Indeksene f og m representerer henholdsvis fullskalastruktur og nedskalert modell.

Tabell 13: Oversikt over hastigheter for fullskalastruktur (V_f) og nedskalert modell (V_m)

V_f [knop]	0,500	1,000	1,500	2,000	2,500	3,000	3,500	4,000	4,250	4,500
V_f [m/s]	0,257	0,514	0,772	1,029	1,286	1,543	1,800	2,058	2,186	2,315
V_m [knop]	0,354	0,707	1,061	1,414	1,768	2,121	2,475	2,828	3,005	3,182
V_m [m/s]	0,182	0,363	0,546	0,728	0,910	1,089	1,272	1,457	1,549	1,640

Syv forskjellige kombinasjoner av baug, hekk, og finner testes for motstand under sleping. Disse kombinasjonene vises i Tabell 14. Modellene illustreres med bilder, forklaring, og hvilken farge de vil representere i resultatene.

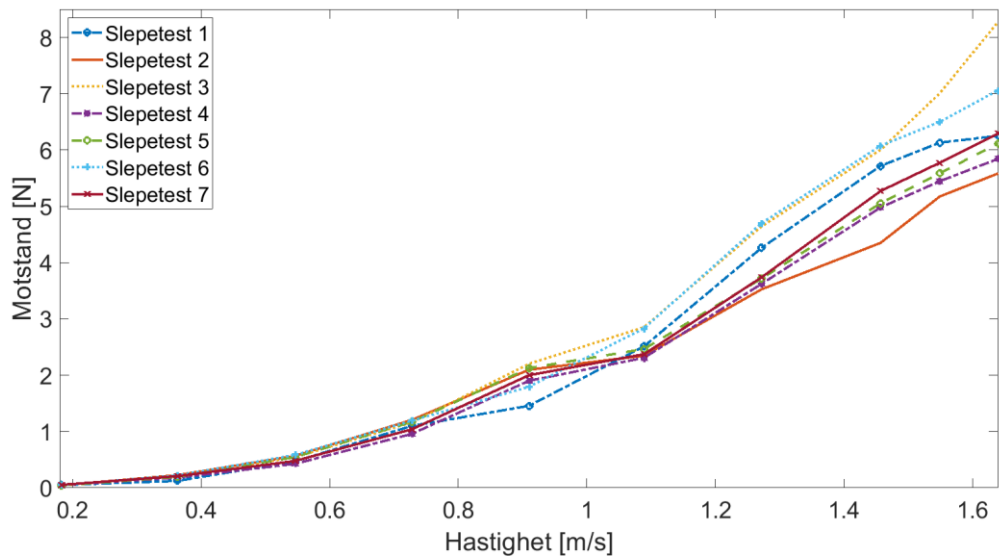
Tabell 14: Oversikt over slepetestede modeller

Navn	Representativ farge	Bilde (← Baug/Hekk →)	Forklaring
Slepetest 1			Konvensjonell baug, spisset hekk + fordelte finner
Slepetest 2			Rund baug, flat hekk
Slepetest 3			Konvensjonell baug, flat hekk
Slepetest 4			Spisset hekk som baug, flat hekk
Slepetest 5			Rund baug, flat hekk + fordelte finner
Slepetest 6			Spisset hekk som baug, konvensjonell baug som hekk
Slepetest 7			Spisset hekk som baug, flat hekk + fordelte finner

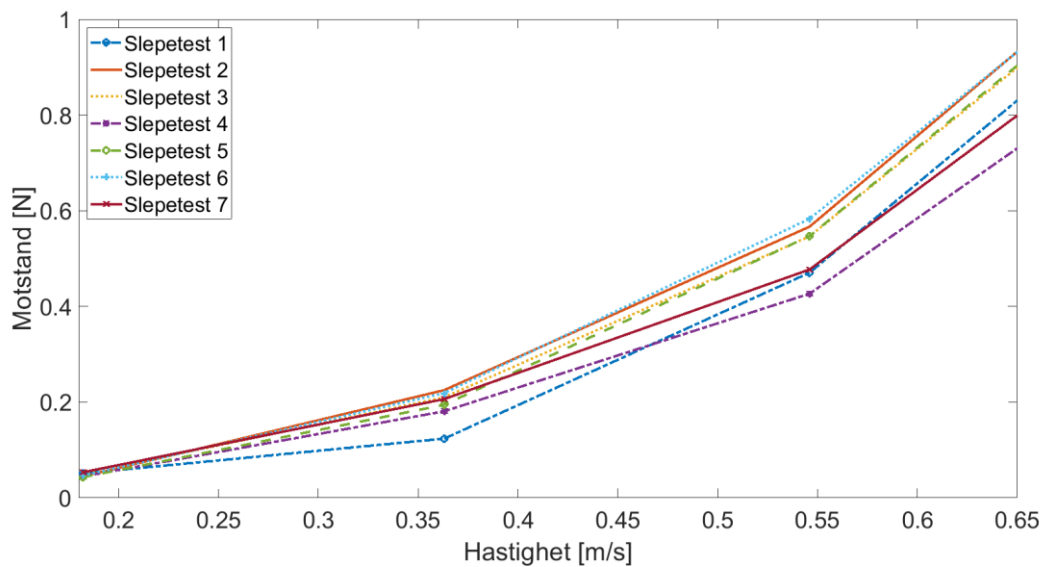
Figur 37 viser resultater fra utførte slepetester, hvor x- og y-aksen henholdsvis representerer hastighet i meter per sekund og motstand i Newton. De syv grafene representerer syv forskjellige kombinasjoner av baug, hekk, og finner.

For å rangere modellenes motstand på en representativ måte for hver hastighet fordeles resultatene inn i lave, middels og høye hastigheter. Dette unngår at motstanden i de høye hastighetene blir dominerende. Figur 38 viser resultater fra slepetester i lave hastigheter. Her

kommer det frem at Slepetest 1 starter med minst motstand, men endrer oppførsel ved økende hastighet. Det ser også ut til at Slepetest 6 er blant de med størst motstand.

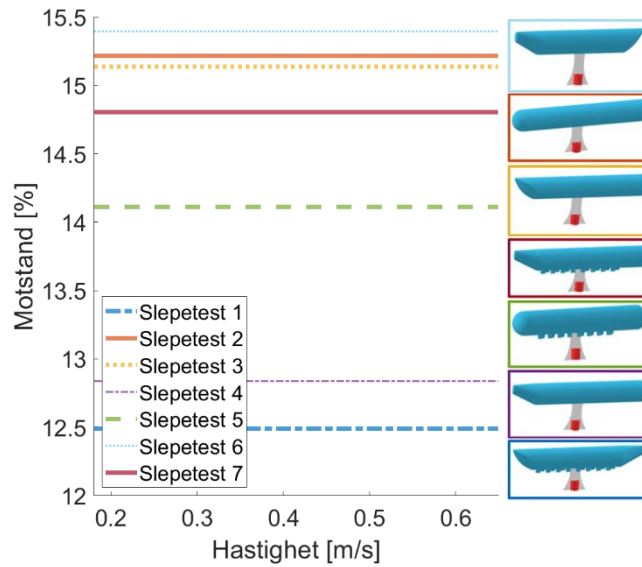


Figur 37: Resultater fra slepetester



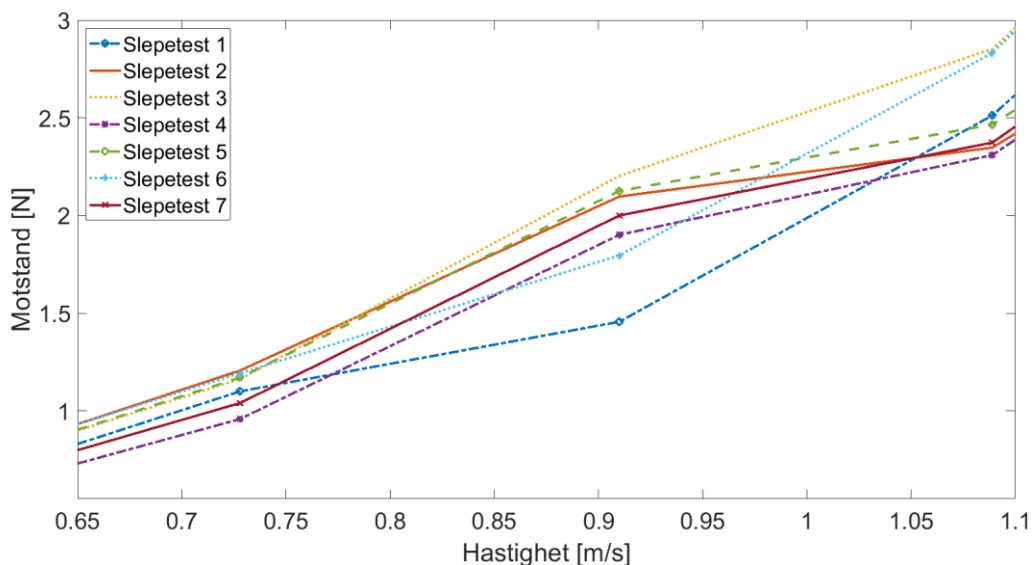
Figur 38: Resultater fra slepetester i lave hastigheter

Rangering av den målte motstanden til de forskjellige modellene i lave hastigheter vises i Figur 39. Modellene illustreres visuelt til høyre, oppført etter størst motstand fra toppen. Motstanden beregnes i prosent, som gjennomsnittet av hvor stor andel hver modell sin motstandsmåling utgjør i total motstandsmåling, i de ulike hastighet. Slepetest 1 har vesentlig mindre motstandsandel enn de andre modellene. Slepetest 4 ligger også relativt lavt på rangeringen, mens Slepetest 2, 3, 5, 6 og 7 har betraktelig større motstandsandel.

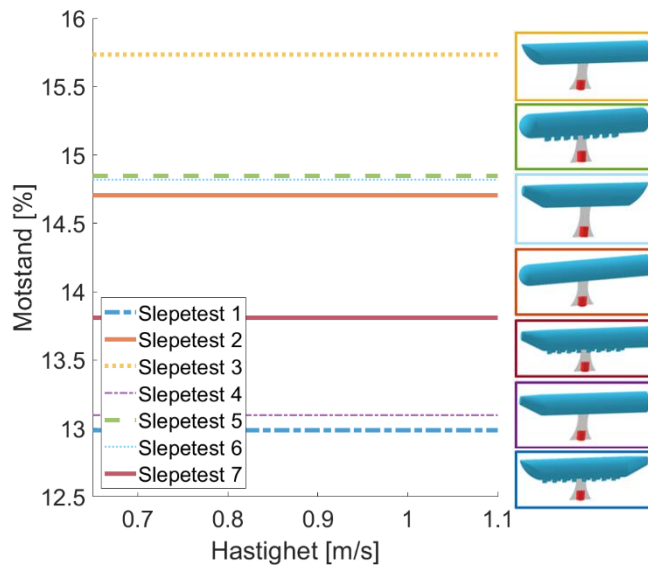


Figur 39: Motstandsranking i lave hastigheter

Figur 40 viser resultater fra slepetester i middels hastigheter. Slepetest 1 og 4 er tilsynelatende blant modellene med minst målt motstand. Slepetest 3 ser derimot ut til å være blant de med størst målt motstand. Følgelig viser Figur 41 en rangering av den målte motstanden til de forskjellige modellene i middels hastigheter. De forskjellige modellene er oppført til høyre, rangert etter størst motstand fra toppen. Motstanden beregnes i prosent som gjennomsnittet av hvor stor andel hver motstandsmåling utgjør, i summen av målt motstand, i hver hastighet. Dette i hastigheter mellom 0,65 og 1,1 m/s. Her kommer det frem at Slepetest 1 og 4 har minst motstand, videre har Slepetest 7 også relativt lav motstand. Følgelig har Slepetest 2, 3, 5 og 6 størst motstand i middels hastigheter.

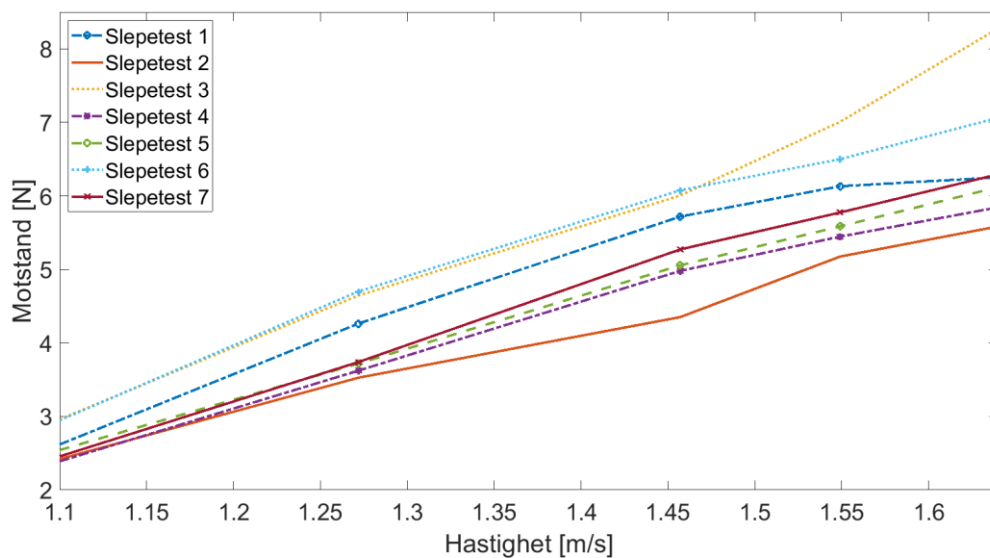


Figur 40: Resultater fra slepetester i middels hastigheter

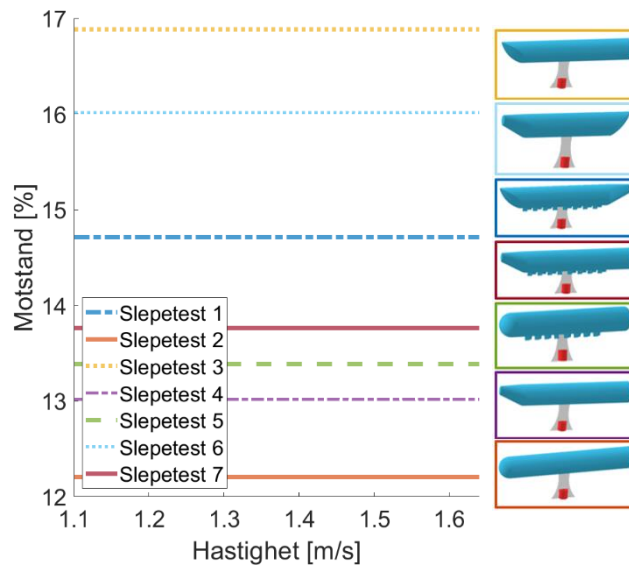


Figur 41: Motstandsranking i middels hastigheter

Figur 42 viser resultater fra slepetester i høye hastigheter. Her kommer det frem at Slepetest 3 og 6 har størst motstand, og Slepetest 2 har minst motstand. Følgelig viser Figur 43 en rangering av den målte motstanden i middels hastigheter. Til høyre i figuren illustreres de forskjellige modellene, oppført etter størst motstand fra toppen. Motstanden beregnes som gjennomsnittet av hvor stor andel hver motstandsmåling utgjør, i summen av motstand målt, i hver hastighet. Dette i hastigheter mellom 1,1 og 1,64 m/s. Her kommer det frem at Slepetest 2 har minst motstand i høye hastigheter, etterfulgt av Slepetest 4, 5 og 7. Slepetest 1 ligger relativt nøytralt i rangeringen. Slepetest 3 og 6 har betraktelig større motstand i høyere hastigheter.



Figur 42: Resultater fra slepetester i høye hastigheter



Figur 43: Motstandsranking i høyere hastigheter

4.2 Bølgedannet motstand

Ifølge delkapittel 2.6.1 (s. 15) har fartøyets lengde en vesentlig betydning for motstand under fremdrift. Det avhenger av hvordan den baugdannede bølgen møter hekkbølgen, hvorvidt de forsterker hverandre, og bidrar til økt motstand, eller om de kansellerer hverandre. Bølgen som dannes ved baugen har en bølgetopp som befinner seg en fjerdedels baugbølgelengde fra der vannlinjen treffer baugen. Hekkbølgen dannes der vannlinjen treffer hekken. Modellenes bølgedannede motstand er teoretisk ulik, da modellene har forskjellig vannlinjelengde. Ved å sammenlikne den målte motstanden til modellene, som har lik vannlinjelengde, tillater det å anta at den med størst målt motstand har et mindre energieffektivt skrog. Måten baugbølgen treffer hekkbølgen fremstilles grafisk for de representative vannlinjelengdene i de forskjellige hastighetene. Dette illustreres for å gi en visuell tolking av tilfellene. Denne tolkingen er ikke tilstrekkelig for å bestemme hvilken av modellene som har størst bidrag fra bølgedannet motstand i de forskjellige hastighetene. Dette kvantifiseres ved å rangere modellenes differanse mellom baugbølgehøyde og hekkbølgehøyde. Stor differanse tilsier kansellerende effekt, derav minst bølgedannet motstand, og motsatt tilfelle for minst differanse. Følgelig sammenliknes dette med den målte motstanden, som gjør det mulig å rangere skrogens energieffektivitet.

4.2.1 Sammenlikning av målt motstand for modeller med lik vannlinjelengde

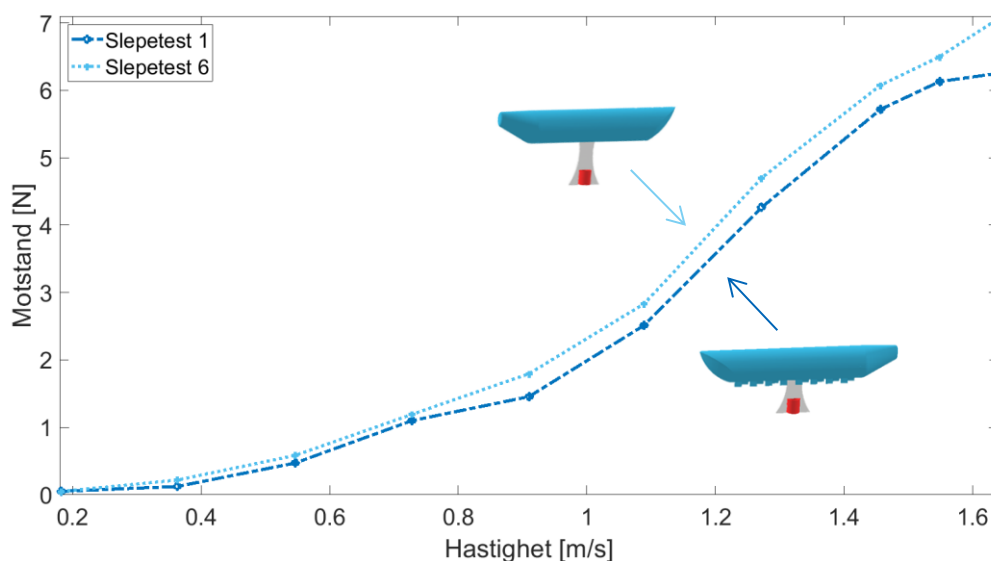
Hastighetene benyttet i slepetestene, sammen med modellenes vannlinjelengde, har en vesentlig påvirkning i rangeringen av bølgedannet motstand. Dette ettersom hastigheten definerer baug- og hekkbølgens lengde under fremdrift. Følgelig bestemmes interaksjonen mellom baug- og hekkbølgehøyde av vannlinjelengden til modellene. Noen av modellene har forskjellige

lengder. Det fører til at den bølgedannede motstanden er ulik, i de tilfellene det gjelder. Oversikt over vannlinjelengdene, tilhørende de forskjellige slepetestene, vises i Tabell 15. Noen av slepetestene har samsvarende vannlinjelengde. Det medfører at den teoretisk bølgedannede motstanden er lik i Slepetest 1 og 6, i Slepetest 2 og 5, og i Slepetest 4 og 7. Dermed kan det redegjøres for hvilke geometriske utforminger som tilsynelatende bidrar til økt motstand. Dette ved å sammenlikne den målte motstanden til de nevnte modellene med lik bølgedannet motstand.

Tabell 15: Oversikt over vannlinjelengder til de slepetestede modellene

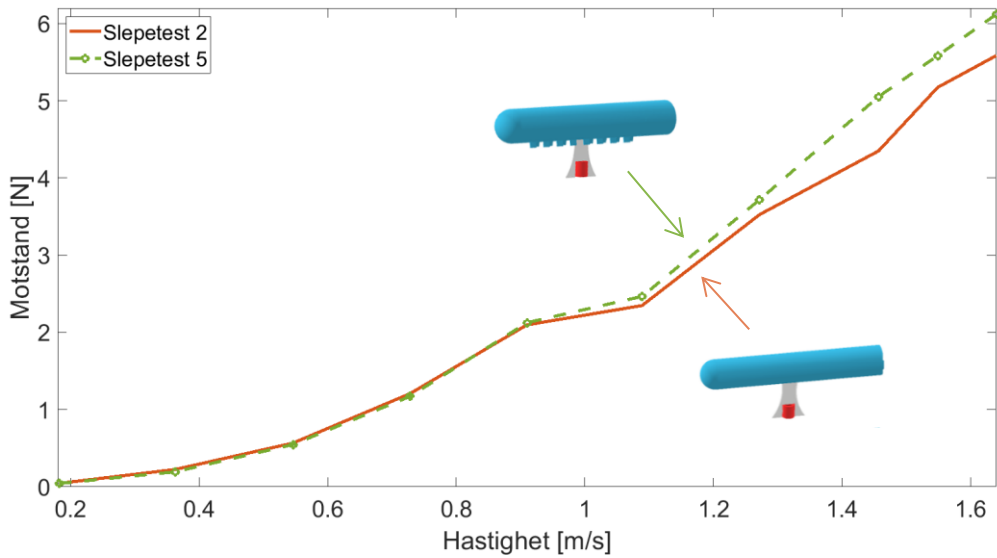
Slepetest	1	2	3	4	5	6	7
Vannlinjelengde [m]	0,575	0,540	0,566	0,555	0,540	0,575	0,555

Resultater fra Slepetest 1 og 6 vises i Figur 44. Her kommer det frem at Slepetest 6 har målt størst motstand i enhver hastighet. Gjennomsnittlig måler den omtrent 17 % mer motstand enn Slepetest 1. Denne forskjellen kan komme av en, eller flere ulike utforminger av modellene. Det kan være de fordelte finnene som bidrar til mindre motstand, den konvensjonelle baugen har mer motstand som hekk, og/eller at den spissede hekken har mer motstand som baug.



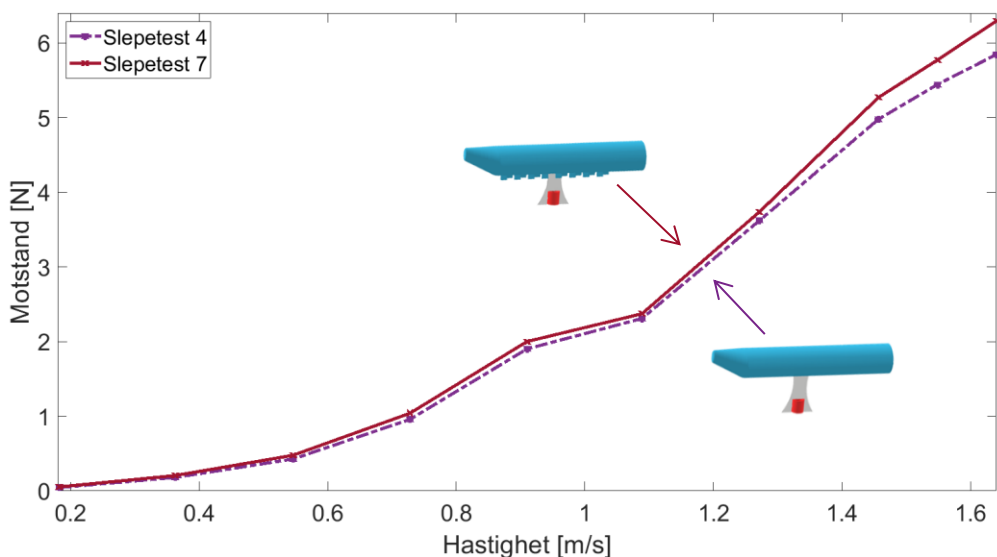
Figur 44: Resultater fra Slepetest 1 og 6

Figur 45 viser resultater fra Slepetest 2 og 5. Her det kommer frem at den målte motstanden til modellene er relativt lik, inntil en hastighet på 1,089 m/s. I høyere hastigheter måler Slepetest 5 gjennomsnittlig 10 % høyere motstand, enn Slepetest 2. Det indikerer at de fordelte finnene hverken bidrar til økt eller mindre motstand i hastigheter under 1,089 m/s. I høyere hastigheter derimot bidrar tilsynelatende finnenes overflateareal til økt motstand.



Figur 45: Resultater fra Slepetest 2 og 5

Figur 46 viser resultater fra Slepetest 4 og 7. Her observeres den målte motstanden til modellene som svært lik, i hastigheter opp til 1,272 m/s. Det tilsier at overflatearealet til finnene bidrar til økt motstand i høyere hastigheter. Slepetest 7 måler gjennomsnittlig 7 % mer motstand, enn Slepetest 4, i høyere hastigheter. Det er mindre enn forskjellen i målt motstand til Slepetest 2 og 5 i høyere hastigheter. Det kan implisere at de fordelte finnene er mindre gunstige sammen med baugen i Slepetest 2 og 5. Sammenliknet med resultater fra Slepetest 1 og 6 er de fordelte finnene mer gunstige kombinert med den konvensjonelle baugen og spissede hekken.



Figur 46: Resultater fra Slepetest 4 og 7

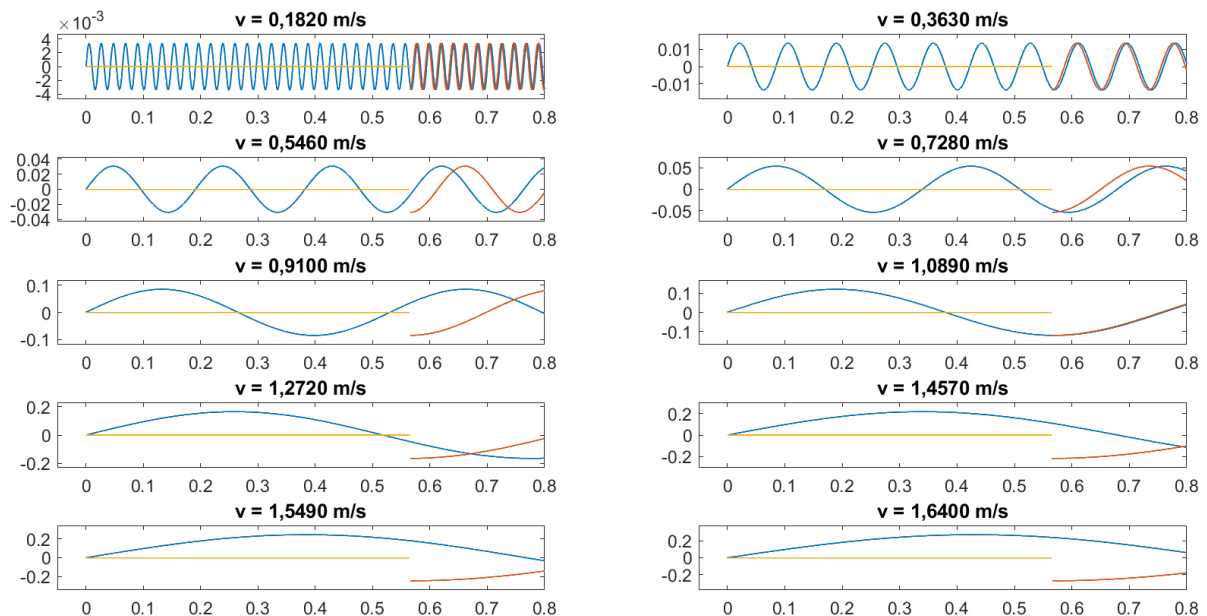
4.2.2 Illustrasjon av baug- og hekkdannede bølger

Baugbølgelengden er lik for hver modell i hver hastighet, da baugbølgelengden defineres av slepehastigheten. Bølgelengden tilhørende hver enkelt hastighet, og en fjerdedel av bølgen, representeres i Tabell 16.

Tabell 16: Hastighet, bølgelengde og $\frac{1}{4}$ bølgelengde

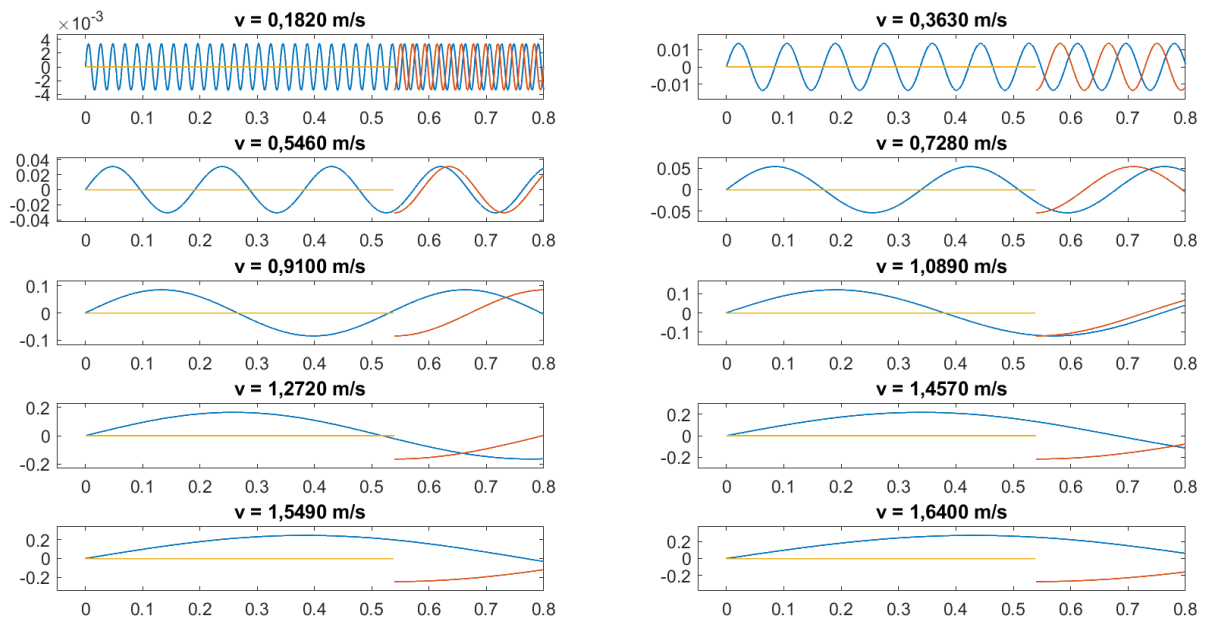
Hastighet [m/s]	0,182	0,363	0,546	0,728	0,910	1,089	1,272	1,457	1,549	1,640
Bølgelengde[m]	0,021	0,084	0,191	0,340	0,530	0,760	1,036	1,360	1,537	1,722
$\frac{1}{4}$ Bølgelengde [m]	0,005	0,021	0,048	0,085	0,133	0,190	0,260	0,340	0,384	0,431

Figur 47 viser hvordan de baugdannede bølgene treffer de hekkdannede bølgene for Slepetest 3 i enhver hastighet den er testet i. Den gule linjen representerer vannlinjelengden til modellen, den blå og røde linjen beskriver henholdsvis baugbølge og hekkbølge. Baugbølgen observeres som forsterkende på hekkbølgen i 0,182, 0,363, 0,728 og 1,089 m/s. Det kan dermed forventes at denne modellen er blant de som har målt høyere motstand i de nevnte hastighetene.



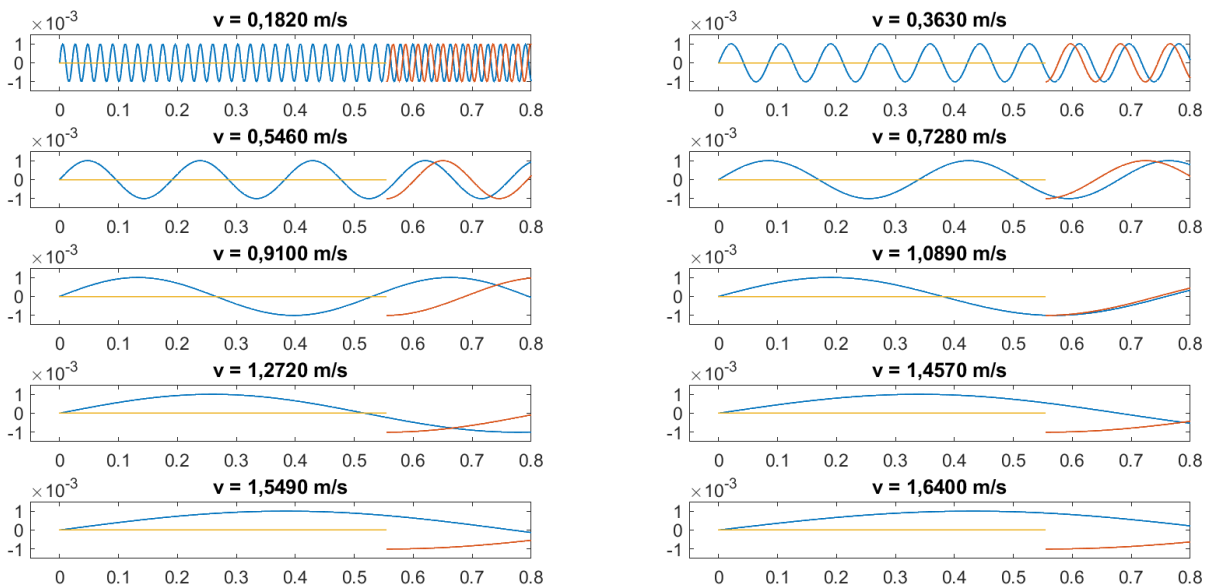
Figur 47: Baugbølger mot hekkbølger for Slepetest 3, vannlinjelengde langs x-aksen og bølgehøyde langs y-aksen

Lengden er konstant for modellene i Slepetest 2 og 5. Det betyr at måten baugbølgen treffer hekkbølgen er lik for modellene, i de forskjellige hastighetene. Begge modellene kan derfor representeres i Figur 48. Den gule linjen illustrerer modellenes vannlinjelengde, den blå og røde linjen beskriver henholdsvis baugbølge og hekkbølge. Større bidrag fra bølgedannet motstand forventes i 0,546 og 1,089 m/s, der baugbølgene observeres som forsterkende på hekkbølgene.



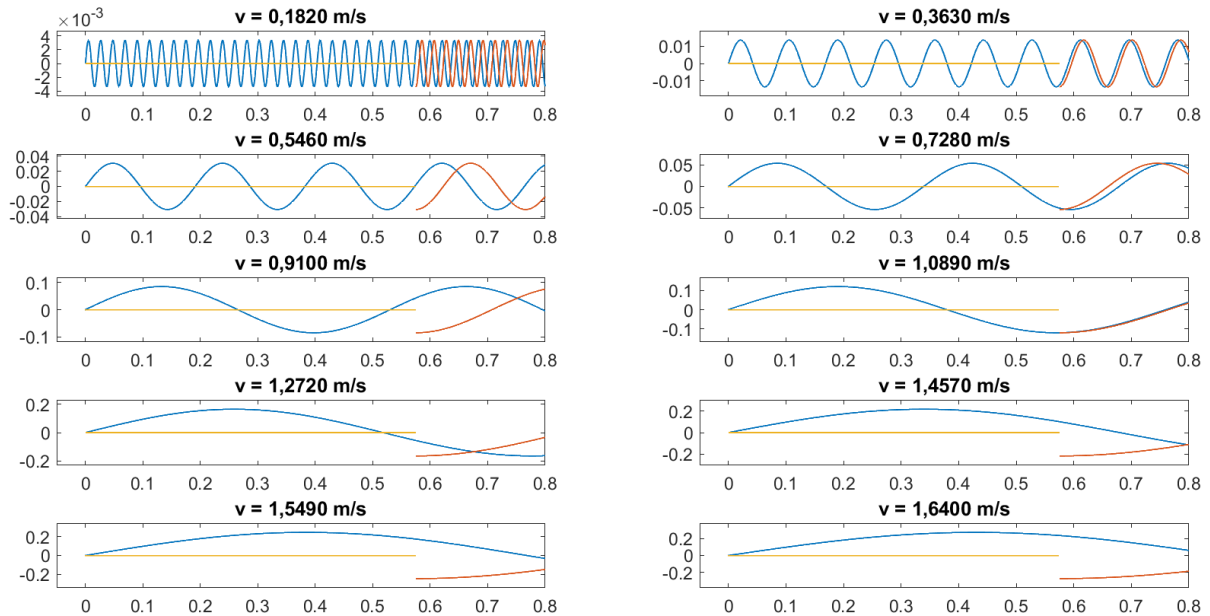
Figur 48: Baugbølger mot hekkbølger for Slepetest 2 og 5, vannlinjelengde langs x-aksen og bølgehøyde langs y-aksen

Modellene i Slepetest 4 og 7 har lik vannlinjelengde, som tilsier likt bidrag fra bølgedannet motstand i de forskjellige hastighetene. Vannlinjelengden til modellene representeres i den gule linjen, den blå kurven baugbølgen og den røde hekkbølgen, i Figur 49. Baugbølgen observeres som noe forsterkende på hekkbølgen i 0,363, 0,728 og 1,089 m/s. Større bidrag fra bølgedannet motstand forventes dermed i de nevnte hastighetene.



Figur 49: Baugbølger mot hekkbølger for Slepetest 4 og 7, vannlinjelengde langs x-aksen og bølgehøyde langs y-aksen

Modellene i Slepetest 1 og 6 har lik vannlinjelengde. Det tilsier at den bølgedannede motstanden er teoretisk lik for modellene, i de forskjellige hastighetene. Vannlinjelengden til modellene representeres i den gule linjen, den blå kurven baugbølgen og den røde hekkbølgen, i Figur 50. Baugbølgen observeres som forsterkende på hekkbølgen i 0,363, 0,728 og 1,089 m/s. Større bidrag fra bølgedannet motstand kan dermed forventes i de nevnte hastighetene.



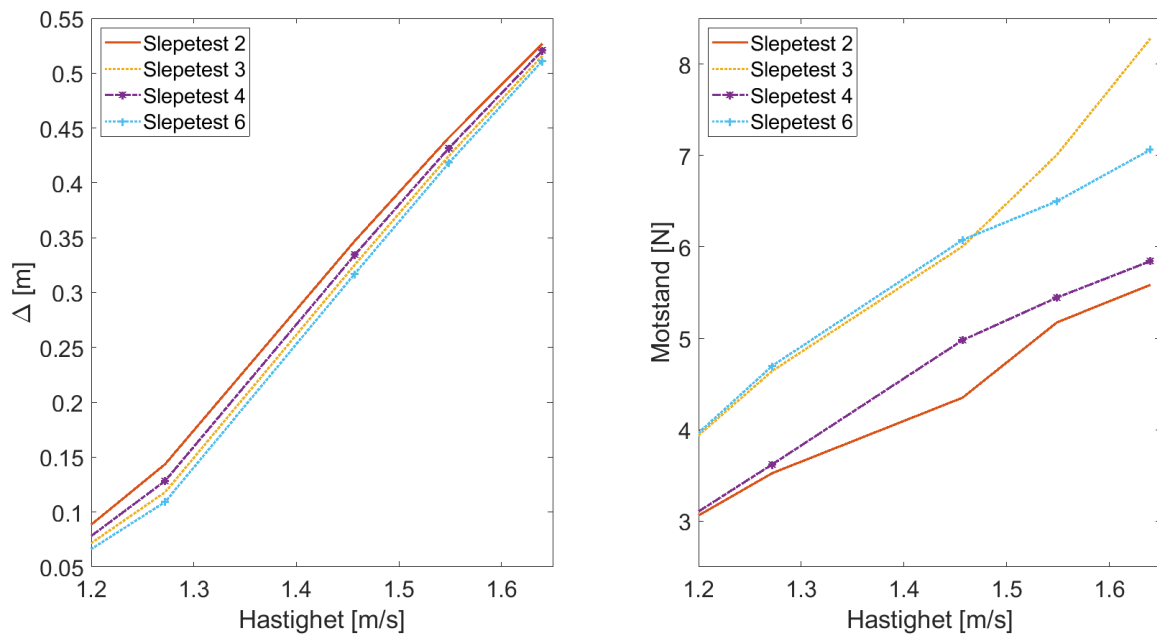
Figur 50: Baugbølger mot hekkbølger for Slepetest 1 og 6, vannlinjelengde langs x-aksen og bølgehøyde langs y-aksen

4.2.3 Rangering av bølgedannet mostand sammenliknet med målt motstand

I denne sammenlikningen er det ønskelig at alle de forskjellige vannlinjelengdene representeres. Modellene uten fordelte finner sammenliknes innledningsvis. Det gjelder modellene i Slepetest 2, 3, 4, og 6. Videre skal modellene med fordelte finner sammenliknes, som er modellene i Slepetest 1, 5 og 7. For at resultatene skal illustreres på en oversiktlig måte, fordeles resultatene inn i høye, middels og lave hastigheter.

Differanse mellom baug- og hekkbølgehøyde ved hekken til modellene i Slepetest 2, 3, 4 og 6 i høye hastigheter fra 1,272 til 1,640 m/s vises i Figur 51 (venstre), sammen med målt motstand for slepetestene (høyre). Det observeres en tydelig sammenheng i resultatene. Slepetest 2 har størst differanse i bølgehøyde og minst målt motstand i de representerte hastighetene. Slepetest 6 har tydelig minst differanse i bølgehøyde, etterfulgt av Slepetest 3 og 4. Dette samsvarer med målt motstand, da Slepetest 6 har størst målt mostand i hastigheter opp til 1,457 m/s, etterfulgt av Slepetest 3 og 4. Slepetest 3 måler størst motstand i de høyeste hastighetene. Dette på tross

av at modellen ikke har størst bidrag fra bølgedannet motstand. Det kan implisere at Slepetest 3 har effekter som bidrar til økt motstand.



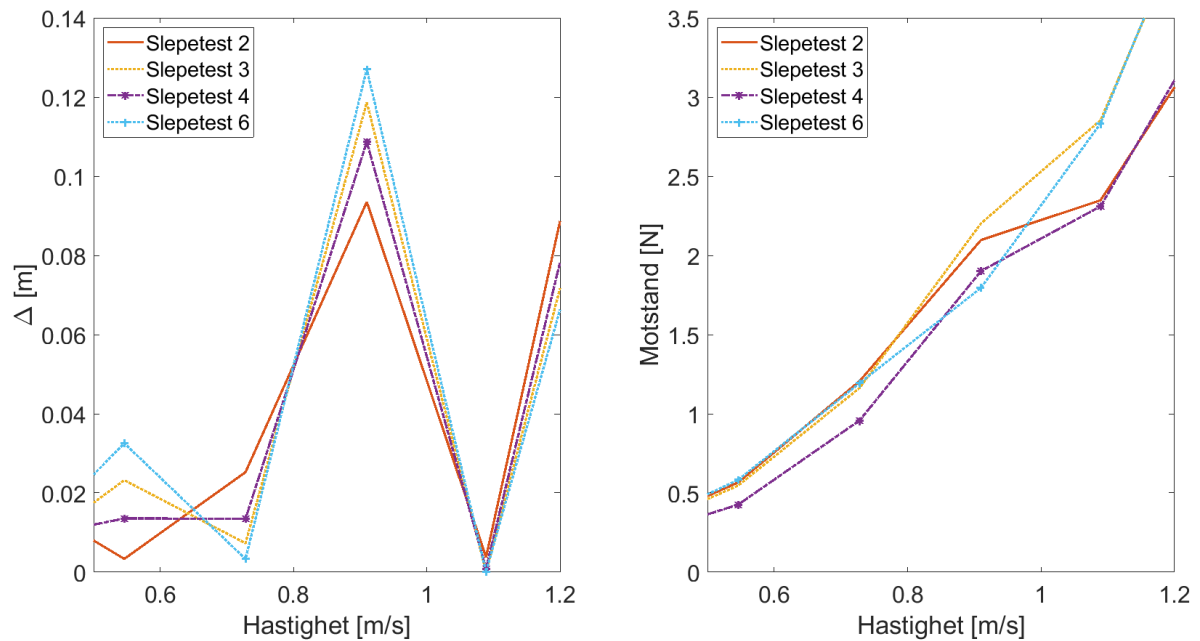
Figur 51: Differanse mellom baugbølgehøyde og hekkbølgehøyde (venstre), samt målt motstand for Slepetest 2, 3, 4 og 6 (høyre) i hastigheter fra 1,272 til 1,640 m/s

Differanse mellom baug- og hekkbølgehøyde ved hekken til modellene i Slepetest 2, 3, 4 og 6 i middels hastigheter fra 0,546 til 1,089 m/s vises i Figur 52 (venstre), sammen med målt motstand (høyre). Slepetest 2 skal ha størst bølgedannet motstand i 0,546 m/s, da den har minst differanse mellom baug- og hekkbølgehøyde. Slepetest 6 derimot skal ha minst bølgedannet motstand, på grunn av størst beregnet differanse mellom bølgehøyder, etterfulgt av Slepetest 3. Den målte motstanden i 0,546 m/s er relativt lik for alle slepetestene, bortsett fra at Slepetest 4 har tydelig mindre målt motstand. Det indikerer at Slepetest 4 har effekter som bidrar til mindre motstand. Alternativt har Slepetest 3 og 6 effekter som bidrar til økt motstand.

Slepetest 2 har størst differanse mellom baug- og hekkbølgehøyde i 0,728 m/s, som tilsier minst bølgedannet motstand. Slepetest 3 og 6 har omtrent like liten differanse mellom bølgehøydene og skal ha mest bølgedannet motstand. Den målte motstanden i den nevnte hastigheten viser relativt lik motstand for alle slepetestene, bortsett fra at Slepetest 4 tydelig har mindre målt motstand. Dette impliserer at Slepetest 4 har effekter som bidrar til mindre motstand. Alternativt har Slepetest 2 effekter som bidrar til økt motstand.

Den beregnede differansen mellom baug- og hekkbølgehøyde i 0,910 m/s er størst for Slepetest 6 og minst for Slepetest 2. Det indikerer at Slepetest 6 skal ha minst bølgedannet motstand og

Slepetest 2 skal ha mest. Dette er relativt samsvarende med målt motstand, bortsett fra at Slepetest 3 måler størst motstand. Dette på tross av at Slepetest 3 skal ha like lite bølgedannet motstand som Slepetest 6. Det indikerer at Slepetest 3 har effekter som bidrar til økt motstand.



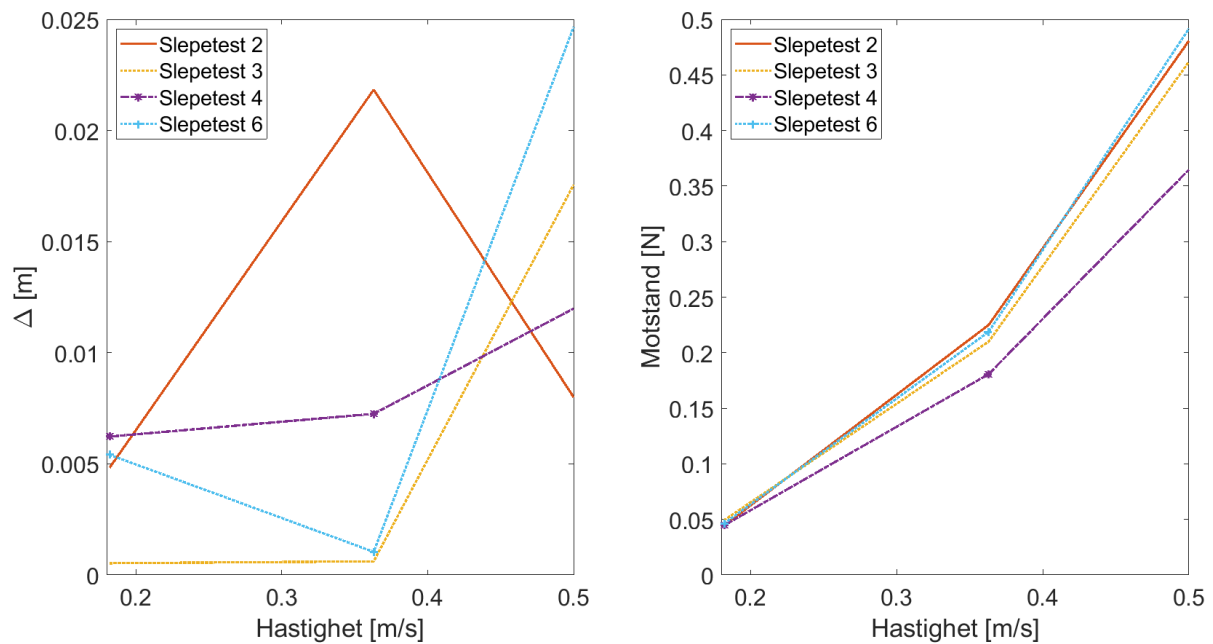
Figur 52: Differanse mellom baugbølgehøyde og hekkbølgehøyde (venstre), samt målt motstand for Slepetest 2, 3, 4 og 6 (høyre) i hastigheter fra 0,546 til 1,089 m/s

Differanse mellom baug- og hekkbølgehøyde i 1,089 m/s er relativt lik for slepetestene. Det indikerer relativt likt bidrag fra bølgedannet motstand. Slepetest 3 og 6 observeres med størst målt motstand, mens Slepetest 2 og 4 har minst målt motstand. Basert på dette har Slepetest 3 og 6 antakeligvis effekter som bidrar til økt motstand. Alternativt har Slepetest 2 og 4 effekter som bidrar til mindre motstand.

Differanse mellom baug- og hekkbølgehøyde, ved hekken i Slepetest 2, 3, 4 og 6, vises i Figur 53 (venstre). Målt motstand, i lave hastigheter fra 0,182 til 0,363 m/s, vises også i Figur 53 (høyre). Forskjellen i målt motstand i en hastighet på 0,182 m/s er så liten at den neglisjeres i dette tilfellet. Dette ettersom den bølgedannede motstanden tilsynelatende har svært liten innvirkning i denne hastigheten.

Den beregnede differansen mellom bølgehøydene i 0,363 m/s tilsier at Slepetest 2 har størst differanse, derav minst bølgedannet motstand, etterfulgt av Slepetest 4. Slepetest 3 og 6 har omtrent like liten differanse mellom bølgehøydene og dermed størst bølgedannet motstand. Den målte motstanden i 0,363 m/s er relativt lik for de forskjellige modellene, bortsett fra at

Slepetest 4 tydelig har minst målt motstand. Det indikerer at Slepetest 4 har effekter som bidrar til mindre motstand. Alternativt har Slepetest 2 effekter som bidrar til økt motstand.

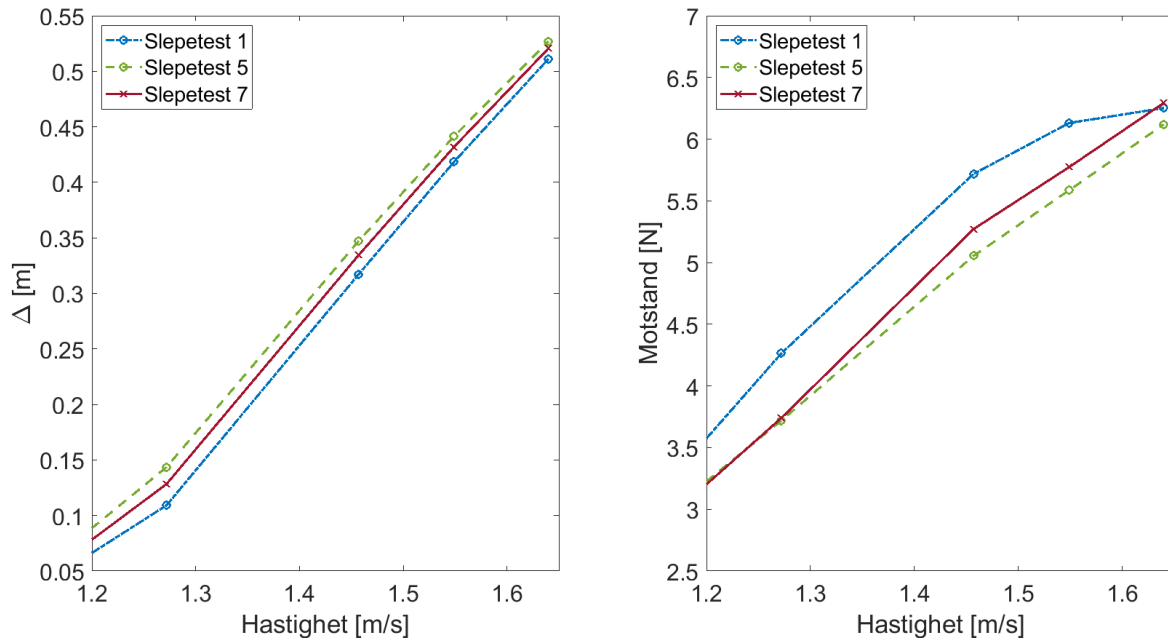


Figur 53: Differanse mellom baugbølgehøyde og hekkbølgehøyde (venstre), samt målt motstand for Slepetest 2, 3, 4 og 6 (høyre) i hastigheter fra 0,182 til 0,363 m/s

Basert på de fremstilte sammenlikningene av estimert bidrag fra bølgedannet motstand og målt motstand for Slepetest 2, 3, 4 og 6, har Slepetest 3 effekter som bidrar til økt motstand, da dette er en repeterende antakelse. Antakelser om at Slepetest 4 har effekter som bidrar til mindre motstand er også gjentakende. Forskjellen mellom de to modellene er utforming av baug. Slepetest 3 har en konvensjonell formet baug og Slepetest 4 har en spisset hekk som baug. Basert på dette betraktes den spisse hekken som baug som mer energieffektiv, mens den konvensjonelle baugen betraktes som mindre energieffektiv. Observasjon av estimert bidrag fra bølgedannet motstand, sammenliknet med målt motstand, har ført til noen antakelser om at Slepetest 2 og 6 har effekter som bidrar til økt motstand. Forskjellen mellom Slepetest 2 og 4 er utforming av baug. Det indikerer at den runde baugen er mindre energieffektiv, enn den spisse hekken som baug. Forskjellen mellom Slepetest 4 og 6 er utforming av hekk. Slepetest 6 har en konvensjonell formet baug som hekk, mens Slepetest 4 har en flat hekk. Basert på dette er den flate hekken mer energieffektiv, enn den konvensjonelle baugen som hekk.

Differanse mellom baug- og hekkbølgehøyde ved hekken til Slepetest 1, 5 og 7 i fremdriftshastigheter fra 1,272 til 1,640 m/s vises i Figur 54 (venstre), sammen med målt motstand (høyre) i de nevnte hastighetene. Slepetest 5 har størst differanse mellom

bølgehøydene i de representerte hastighetene, mens Slepetest 1 har minst differanse. Det tilsier at Slepetest 5 har minst bølgedannet motstand og Slepetest 1 har størst bølgedannet motstand. Dette korrelerer med målt motstand, da Slepetest 5 måler minst motstand, og Slepetest 1 generelt måler størst motstand.

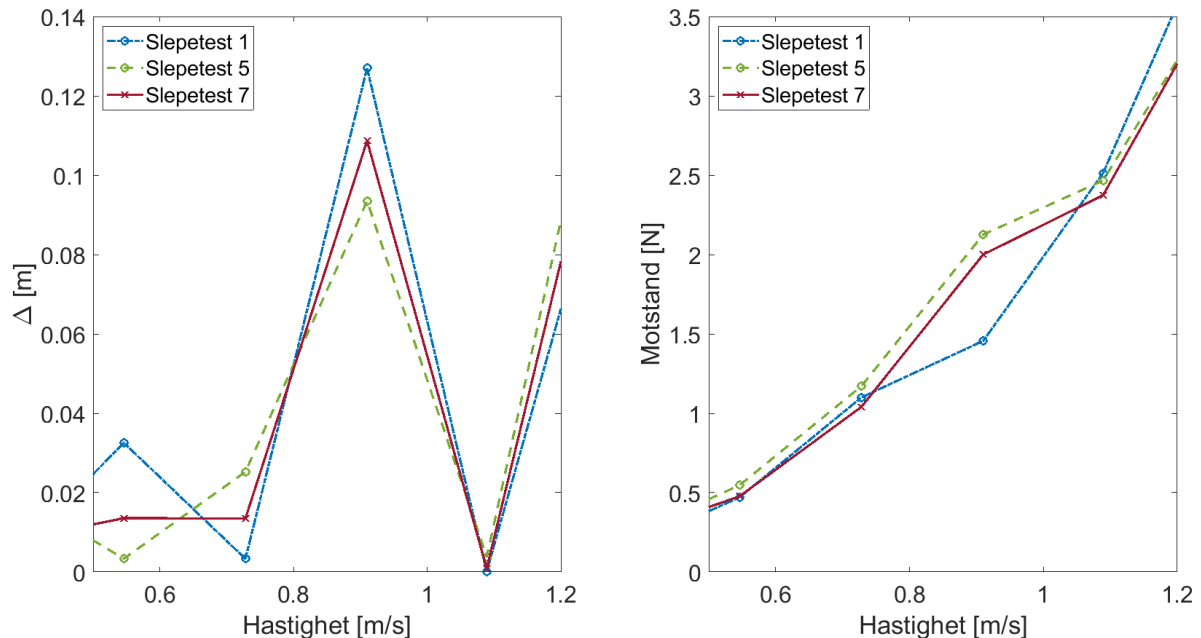


Figur 54: Differanse mellom baugbølgehøyde og hekkbølgehøyde (venstre), samt målt motstand for Slepetest 1, 5 og 7 (høyre) i hastigheter fra 1,272 til 1,640 m/s

Differanse mellom baugbølgehøyde og hekkbølgehøyde i Slepetest 1, 5 og 7, i hastigheter fra 0,546 til 1,089 m/s representertes i Figur 55 (venstre). Målt motstand i de nevnte hastighetene vises også i Figur 55 (høyre). Slepetest 5 har minst differanse mellom bølgehøydene i 0,546 m/s. Det medfører at Slepetest 5 skal ha størst bølgedannet motstand. Slepetest 1 skal derimot ha minst bølgedannet motstand, på grunn av størst differanse mellom bølgehøydene, i den nevnte hastigheten. Dette samsvarer med målt motstand, da Slepetest 5 måler størst motstand og Slepetest 1 måler minst motstand. Slepetest 7 måler like lite motstand som Slepetest 1. Det indikerer at Slepetest 7 har effekter som bidrar til mindre motstand. Alternativt har Slepetest 1 effekter som bidrar til mer motstand.

Den beregnede differansen mellom bølgehøydene i 0,728 m/s er minst for Slepetest 1 og størst for Slepetest 5. Det indikerer størst bølgedannet motstand i Slepetest 1 og minst i Slepetest 5. På tross av dette måler Slepetest 5 størst motstand i den nevnte hastigheten. Det indikerer at modellen har effekter som bidrar til økt motstand. Alternativt har Slepetest 1 og 7 effekter som bidrar til mindre motstand.

I en fremdriftshastighet på 0,910 m/s har Slepetest 1 størst differanse mellom bølgehøydene og Slepetest 5 minst. Det tilsier minst bidrag fra bølgedannet motstand i Slepetest 1 og størst bidrag i Slepetest 5. Dette korrelerer med målt motstand, da Slepetest 5 måler størst motstand og Slepetest 1 måler minst motstand i 0,910 m/s.



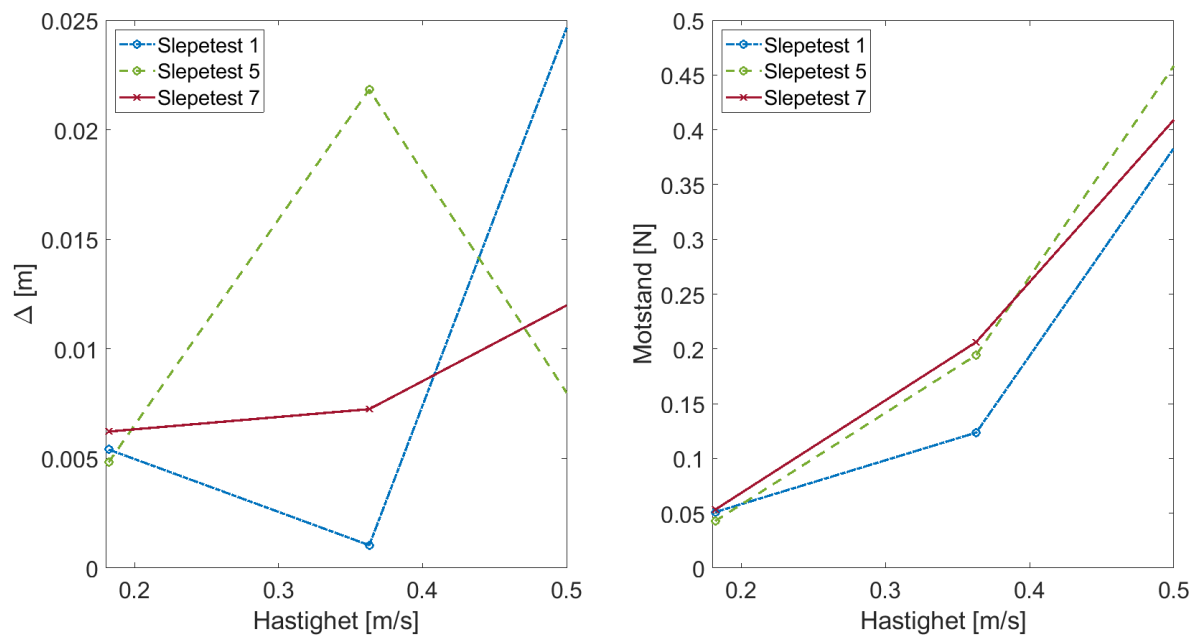
Figur 55: Differanse mellom baugbølgehøyde og hekkbølgehøyde (venstre), samt målt motstand for Slepetest 1, 5 og 7 (høyre) i hastigheter fra 0,546 til 1,089 m/s

Differanse mellom baugbølgehøyde og hekkbølgehøyde ved hekken er relativt liten og lik for alle slepetestene i 1,089 m/s. Det indikerer relativt likt bidrag fra bølgedannet motstand. Den målte motstanden er størst for Slepetest 1 og 5, mens Slepetest 7 måler minst motstand. Det tilsier at Slepetest 1 og 5 kan ha effekter som bidrar til økt motstand. Alternativt tilsier det at Slepetest 7 kan ha effekter som bidrar til mindre motstand.

Differanse mellom baugbølgehøyde og hekkbølgehøyde ved hekken i Slepetest 1, 5 og 7 i lave hastigheter fra 0,182 til 0,363 m/s vises i Figur 56 (venstre). Målt motstand i de nevnte hastighetene vises også i Figur 56 (høyre). Differansen mellom bølgehøydene er svært lik for de representerte slepetestene i 0,182 m/s. Dette samsvarer med den målte motstanden, da den er tilnærmet lik for modellene i den nevnte hastigheten.

Differansen mellom bølgehøydene i 0,363 m/s er størst for Slepetest 5 og minst for Slepetest 1. Det tilsier minst bølgedannet motstand for Slepetest 5 og størst bølgedannet motstand for Slepetest 1. Dette avviker fra målt motstand, da Slepetest 1 måler minst motstand. Følgelig

måler Slepetest 5 og 7 omtrent like stor motstand. Det impliserer at Slepetest 5 og 7 har effekter som bidrar til økt motstand. Alternativt har Slepetest 1 effekter som bidrar til mindre motstand.

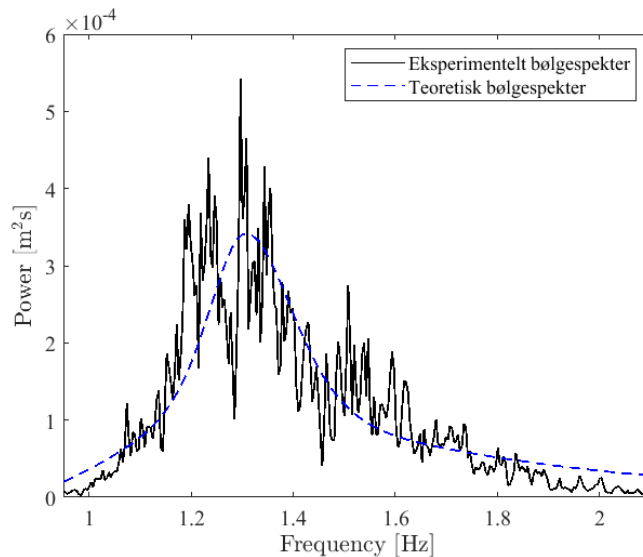


Figur 56: Differanse mellom baugbølgehøyde og hekkbølgehøyde (venstre), samt målt motstand for Slepetest 1, 5 og 7 (høyre) i hastigheter fra 0,182 til 0,363 m/s

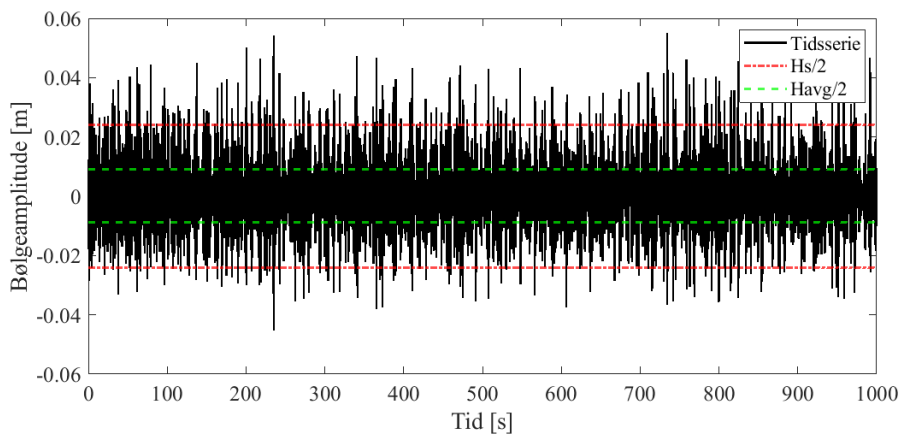
Fremstilte sammenlikninger mellom estimert bidrag fra bølgedannet motstand og målt motstand tilsier at Slepetest 5 har effekter som bidrar til økt motstand, da det er en repeterende observasjon. De fremstilte resultatene har ført til antakelser om at Slepetest 1 og 7 har effekter som bidrar både til økt og mindre motstand. Ut fra dette er antakeligvis effektene relativt nøytrale, i vurdering av energieffektivitet. Forskjellen mellom Slepetest 5 og 7 er utforming av baug. Slepetest 5 har rund baug, mens Slepetest 7 har spisset hekk som baug. Det fører til at den runde baugen betraktes som mindre energieffektiv, enn den spisse hekken som baug. Forskjellen mellom Slepetest 1 og 5 er utforming av baug og hekk. Slepetest 1 har konvensjonell baug og spisset hekk, mens Slepetest 5 har rund baug og flat hekk. Konvensjonell baug og spisset hekk er tilsynelatende en mer energieffektiv kombinasjon, enn rund baug og flat hekk.

4.3 Bølgekalkibrering av bølgedata

Spektralfordelingen av JONSWAP-1 vises i Figur 57 og tidsserien som brukes for å lage den vises i Figur 58. Bølgestatistikk for JONSWAP-1 vises i Tabell 17, der H_S , T_P og T_Z bestemmes fra det teoretiske bølgespekteret som er tilnærmet det eksperimentelle. Den gjennomsnittlige bølgehøyden H_{avg} er funnet i tidsserien. Bølgespekterets bølgeperiode gir en bølgelengde på 0,914 meter, omtrent 1,6 ganger vannlinjelengden til modellene.



Figur 57: Eksperimentelt og teoretisk bølgespekter for JONSWAP-1

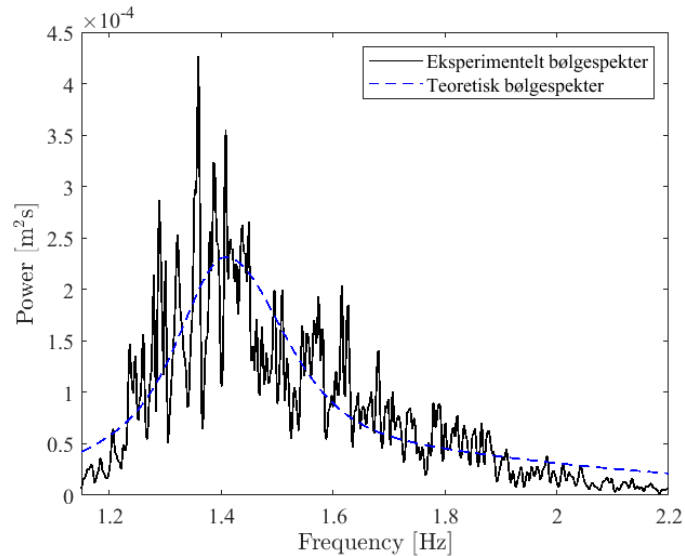


Figur 58: Tidsserie for et utsnitt av JONSWAP-1

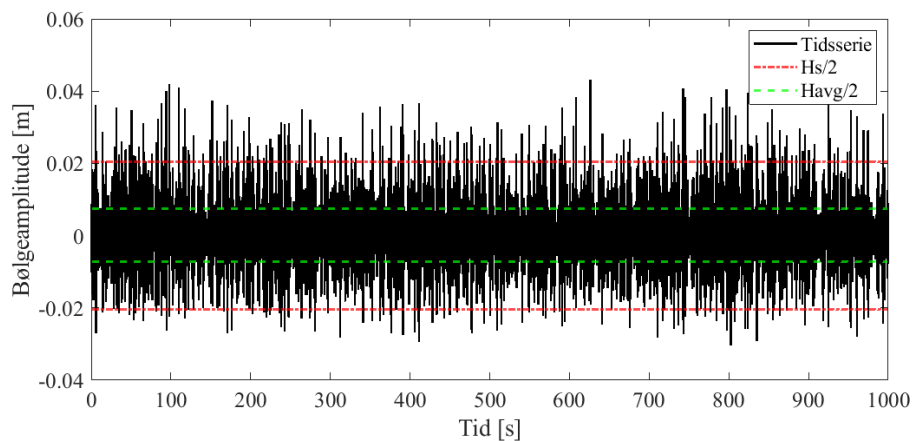
Tabell 17: Bølgestatistikk for JONSWAP-1

Variabel	Modellskala verdi	Fullskala verdi	Enhet
H_S	0,0480	0,0960	m
H_{avg}	0,0178	0,0356	m
T_P	0,7650	1,0819	s
T_Z	0,6038	0,8539	s

Spektralfordelingen av JONSWAP-2 vises i Figur 59 og tidsserien som brukes for å lage den vises i Figur 60. Bølgestatistikk for JONSWAP-2 vises i Tabell 18, der H_S , T_P og T_Z bestemmes fra det teoretiske bølgespekteret som er tilnærmet det eksperimentelle. Den gjennomsnittlige bølgehøyden H_{avg} er funnet i tidsserien. Bølgespekterets periode gir en bølgelengde på 0,787 meter, som er omtrent 1,4 ganger vannlinjelengden til modellene.



Figur 59: Eksperimentelt og teoretisk bølgespekter for JONSWAP-2

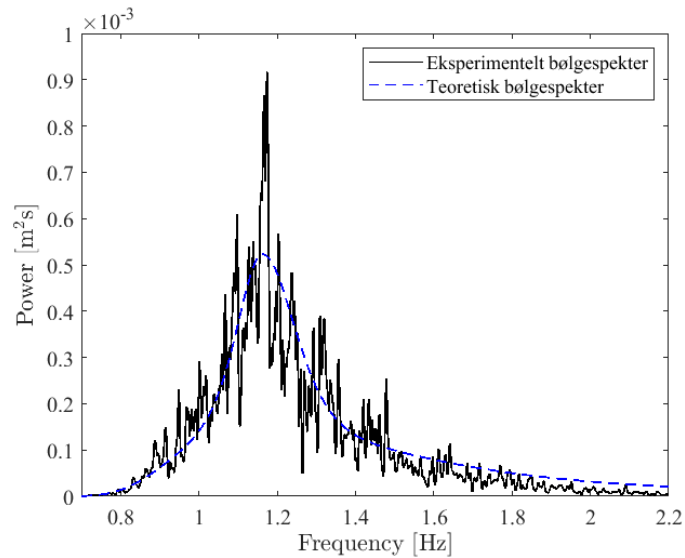


Figur 60: Tidsserie for et utsnitt av JONSWAP-2

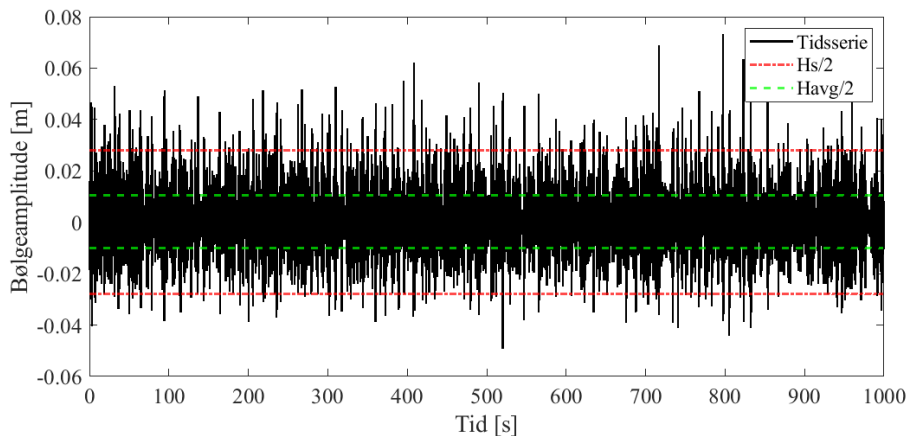
Tabell 18: Bølgestatistikk for JONSWAP-2

Variabel	Modellskala verdi	Fullskala verdi	Enhet
H_S	0,0410	0,0820	m
H_{avg}	0,0148	0,0296	m
T_P	0,710	1,0041	s
T_Z	0,560	0,7920	s

Spektralfordelingen av JONSWAP-3 vises i Figur 61 og tidsserien som brukes for å lage den vises i Figur 62. Bølgestatistikk for JONSWAP-3 vises i Tabell 19, der H_S , T_P og T_Z bestemmes fra det teoretiske bølgespekteret som er tilnærmet det eksperimentelle. Den gjennomsnittlige bølgehøyden H_{avg} er funnet i tidsserien. Bølgespekterets periode gir en bølgelengde på 1,155 meter, som tilsvarer omtrent 2,1 ganger vannlinjelengden til modellene.



Figur 61: Eksperimentelt og teoretisk bølgespekter for JONSWAP-3



Figur 62: Tidsserie for et utsnitt av JONSWAP-3




Tabell 19: Bølgestatistikk for JONSWAP-3

Variabel	Modellskala verdi	Fullskala verdi	Enhet
H_S	0,0560	0,1120	m
H_{avg}	0,0206	0,0412	m
T_P	0,860	1,2162	s
T_Z	0,679	0,9603	s

4.4 Responsdata fra Qualisys

Oversikt over modellene som testes i MarinLab, for å finne deres RAO-er, vises i Tabell 20. Her beskrives bølgespektrene de forskjellige modellene utsettes for. Alle modellene testes i et felles bølgespekter, både i 0 og 22 grader angrepsvinkel. De testes i omtrent 1360 sekunder, tilsvarende 1920 sekunder for fullskalastrukturen, som utgjør ca. 32 minutter. I resultatene er det hensiktsmessig å diskutere hvilken modell som tilsynelatende har minst og størst respons, i de forskjellige frihetsgradene. Hensikten med dette er å redegjøre for hvilken modell som opptrer mest stabil, enkeltvis i hiv, trim og rull, i de forskjellige angrepsvinklene. Modell 7 testes i to ytterligere bølgespektre. Teoretisk skal RAO-ene se relativt lik ut i de forskjellige bølgespektrene, da modellen utsettes for samme angrepsvinkel. Resultatene fra disse testene muliggjør redegjørelse av hvorvidt dette oppnås under testkjøringen på MarinLab.

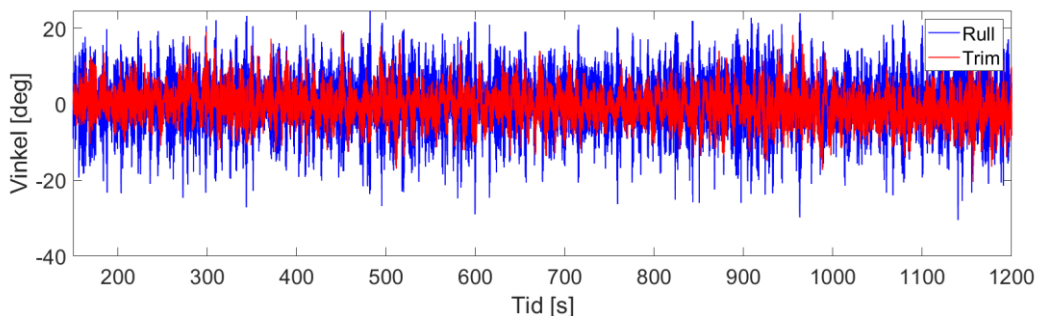
Tabell 20: Oversikt modelltester i bølger på MarinLab

Navn	Bilde (←Baug – Hekk →)	Bølgespekter	Angrepsvinkel [deg]
Modell 1		JONSWAP-1	0
		JONSWAP-1	22
Modell 2		JONSWAP-1	0
		JONSWAP-1	22
Modell 7		JONSWAP-1	0
		JONSWAP-1	22
		JONSWAP-2	0
		JONSWAP-3	0

Oversikt over responsstatistikken til Modell 1 i JONSWAP-1, med en angrepsvinkel på 0 og 22 grader vises henholdsvis i Tabell 21 og Tabell 22. Denne statistikken hentes henholdsvis fra responsdata som vises i Figur 63 og Figur 64. Både gjennomsnittlig rullvinkel og trimvinkel øker betraktelig, ved økning av angrepsvinkel fra 0 til 22 grader. Gjennomsnittlig trimvinkel øker med omtrent 6,87 grader og gjennomsnittlig rullvinkel øker med omtrent 2,93 grader.

Tabell 21: Responsstatistikk til Modell 1 i JONSWAP-1, i 0 grader angrepsvinkel

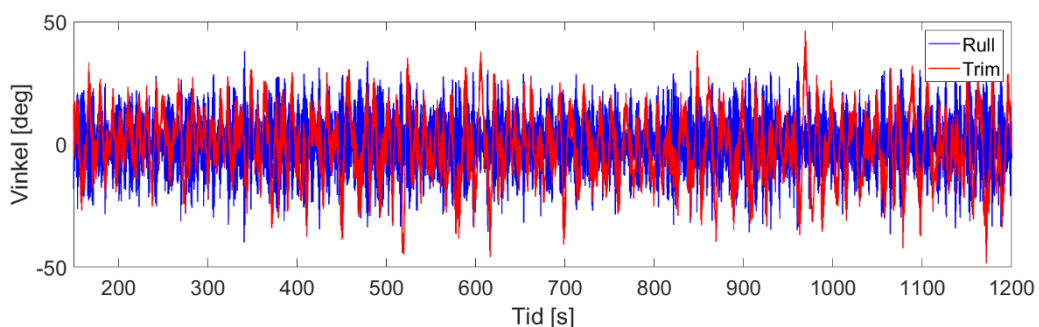
Variabel	Verdi	Enhet
Trim _{max}	20,37	deg
Trim _{snitt}	3,63	deg
Rull _{max}	30,43	deg
Rull _{snitt}	5,85	deg



Figur 63: Responsdata til Modell 1 i JONSWAP-1, i 0 grader angrepsvinkel

Tabell 22: Responsstatistikk til Modell 1 i JONSWAP-1, i 22 grader angrepsvinkel

Variabel	Verdi	Enhet
Trim _{max}	48,35	deg
Trim _{snitt}	10,50	deg
Rull _{max}	39,79	deg
Rull _{snitt}	8,78	deg

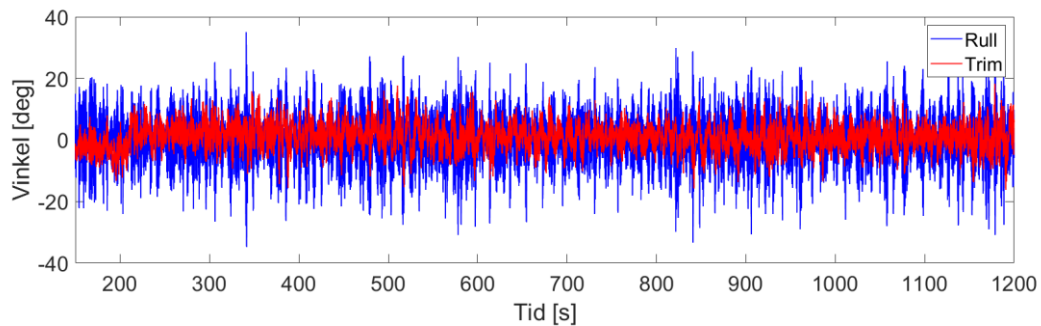


Figur 64: Responsdata til Modell 1 i JONSWAP-1, i 22 grader angrepsvinkel

Oversikt over responsstatistikken til Modell 2 i JONSWAP-1 med en angrepsvinkel på 0 og 22 grader vises henholdsvis i Tabell 23 og Tabell 24. Denne statistikken hentes henholdsvis fra responsdata som vises i Figur 65 og Figur 66. Endringen av gjennomsnittlig rullvinkel er neglisjerbar ved økning av angrepsvinkel fra 0 til 22 grader. Trimvinkelen endres derimot betraktelig, da den gjennomsnittlige trimvinkelen øker med omtrent 7,93 grader.

Tabell 23: Responsstatistikk til Modell 2 i JONSWAP-1, i 0 grader angrepsvinkel

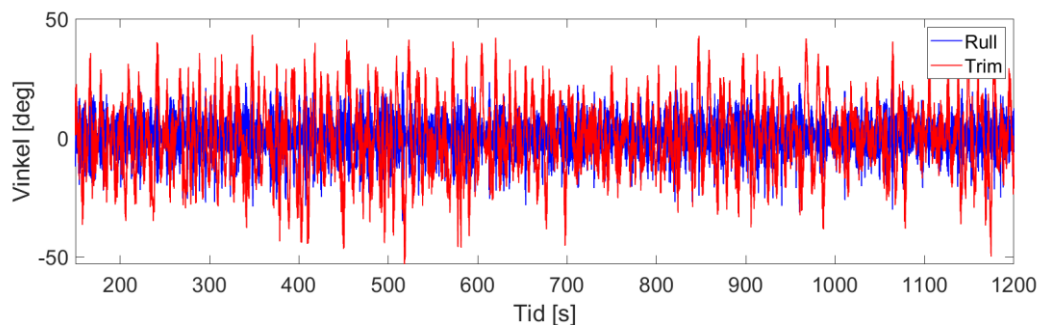
Variabel	Verdi	Enhet
Trim _{max}	18,18	deg
Trim _{snitt}	3,55	deg
Rull _{max}	34,96	deg
Rull _{snitt}	6,29	deg



Figur 65: Responsdata til Modell 2 i JONSWAP-1, i 0 grader angrepsvinkel

Tabell 24: Responsstatistikk til Modell 2 i JONSWAP-1, i 22 grader angrepsvinkel

Variabel	Verdi	Enhet
Trim _{max}	53,07	deg
Trim _{snitt}	11,48	deg
Rull _{max}	34,93	deg
Rull _{snitt}	6,08	deg

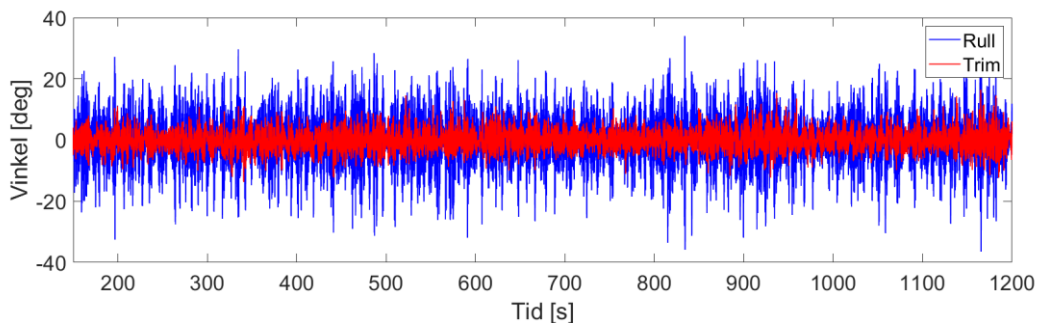


Figur 66: Responsdata til Modell 2 i JONSWAP-1, i 22 grader angrepsvinkel

Oversikt over responsstatistikken til Modell 7 i JONSWAP-1, med en angrepsvinkel på 0 og 22 grader vises henholdsvis i Tabell 25 og Tabell 26. Denne statistikken hentes henholdsvis fra responsdata som vises i Figur 67 og Figur 68. Gjennomsnittlig rullvinkel endres svært lite ved økning av angrepsvinkel fra 0 til 22 grader. Respons i trim derimot endres betraktelig, med økning av gjennomsnittlig trimvinkel på omtrent 9,08 grader.

Tabell 25: Responsstatistikk til Modell 7 i JONSWAP-1, i 0 grader angrepsvinkel

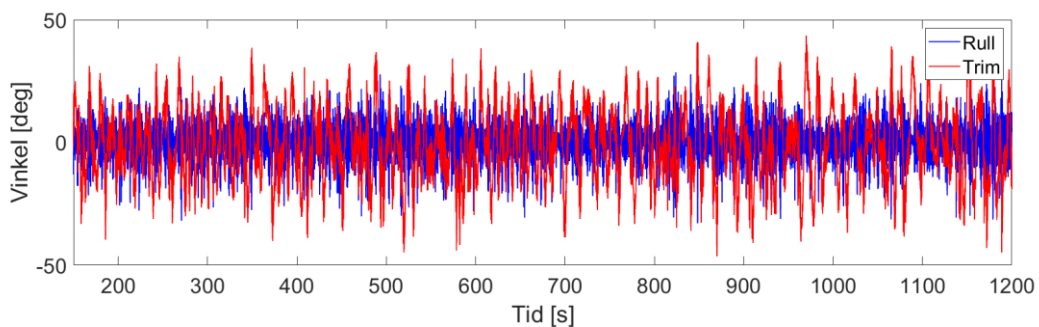
Variabel	Verdi	Enhet
Trim _{max}	16,27	deg
Trim _{snitt}	2,64	deg
Rull _{max}	36,39	deg
Rull _{snitt}	6,40	deg



Figur 67: Responsdata til Modell 7 i JONSWAP-1, i 0 grader angrepsvinkel

Tabell 26: Responsstatistikk til Modell 7 i JONSWAP-1, i 22 grader angrepsvinkel

Variabel	Verdi	Enhet
Trim _{max}	46,39	deg
Trim _{snitt}	11,72	deg
Rull _{max}	33,87	deg
Rull _{snitt}	6,10	deg



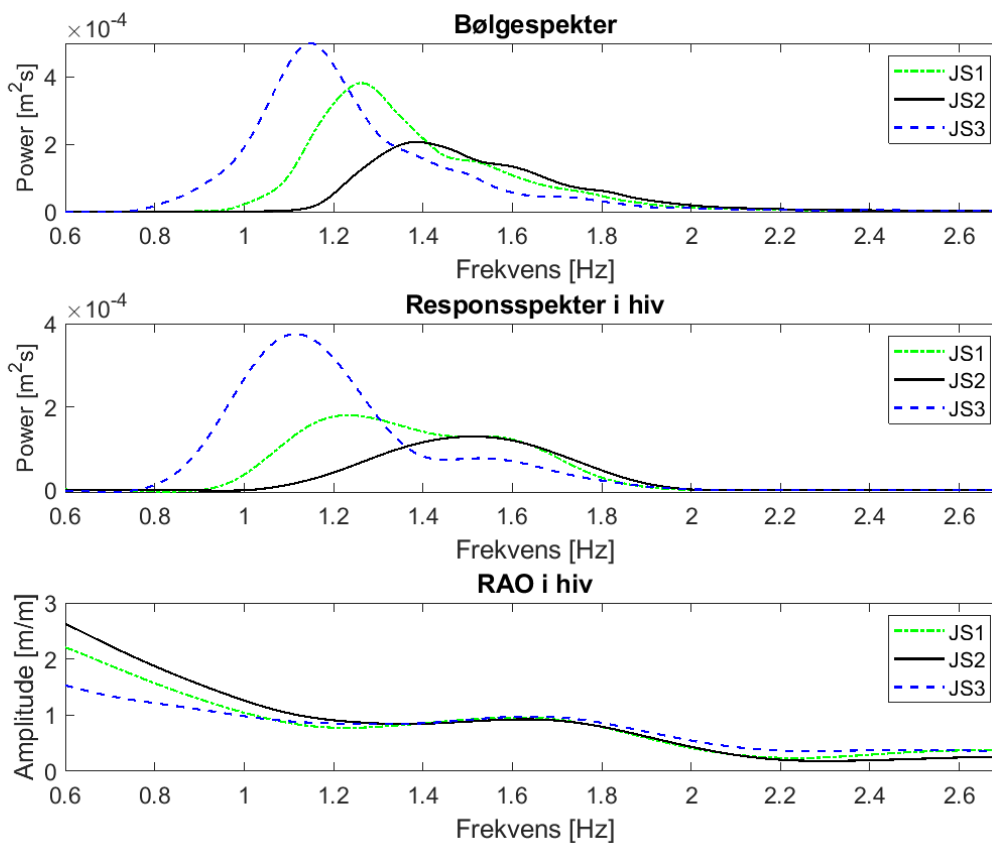
Figur 68: Responsdata til Modell 7 i JONSWAP-1, i 22 grader angrepsvinkel

4.5 Sammenlikning av eksperimentelle RAO-er

Bølgespektre, responsspektre og RAO-er i hiv, trim og rull sammenliknes for Modell 7 i tre forskjellige bølgespektre. Dette med hensikt til å undersøke konsistens i RAO-ene, enkeltvis i hiv, trim og rull. Dette ettersom RAO-ene teoretisk skal være like i de forskjellige bølgespektrene, da angrepsvinkelen er lik i disse testene. Følgelig sammenliknes bølgespektre, responsspektre og RAO-er i hiv, trim og rull for Modell 1, 2 og 7 i 0 og 22 grader angrepsvinkel. Dette med intensjon om å redegjøre for hvilken modell som har minst og mest respons i de forskjellige frihetsgradene og angrepsvinklene.

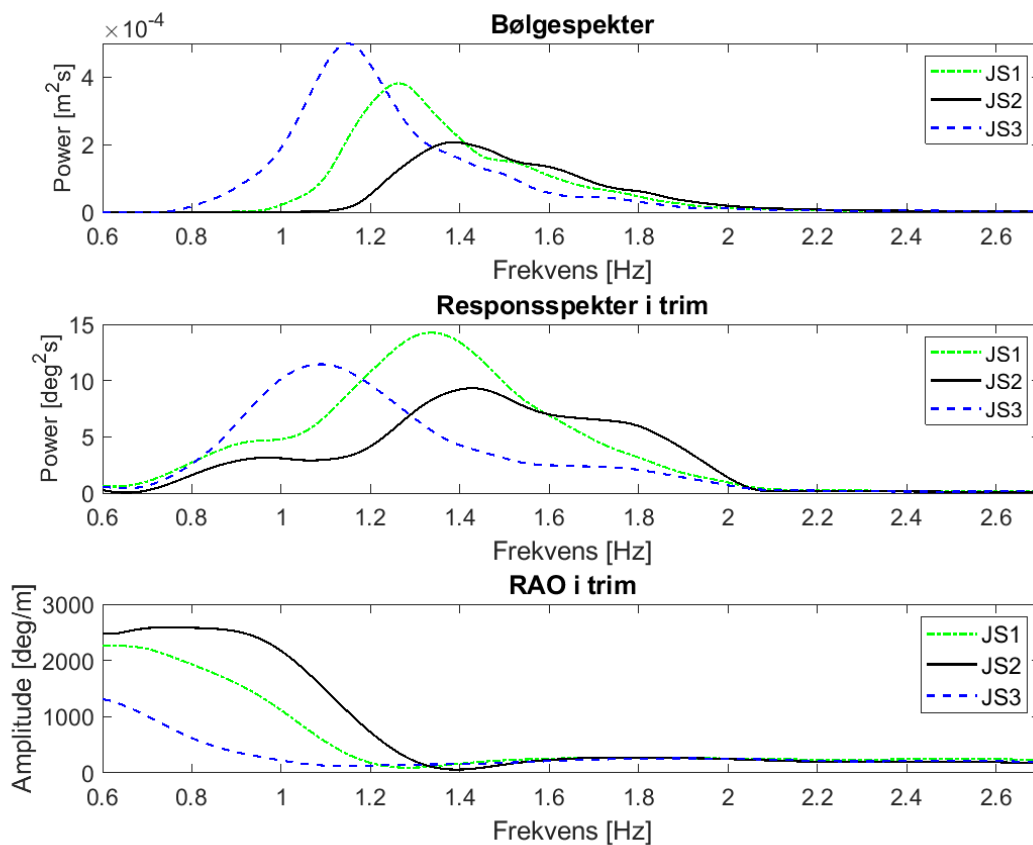
4.5.1 Eksperimentelle RAO-er for Modell 7 – JONSWAP-1, -2 og -3

Oversikt over bølgespektre, responsspektre i hiv og RAO i hiv for Modell 7 i JONSWAP-1, -2 og -3 vises i Figur 69. Modellens RAO er tilnærmet lik i frekvenser større enn 1,3 Hz, da større avvik observeres i lavere frekvenser. Årsaken til dette kan være at de lave bølgehøydene, til de lavfrekvente bølgene, forårsaker økt tilstedeværelse av støy og usikkerhet i målingene.



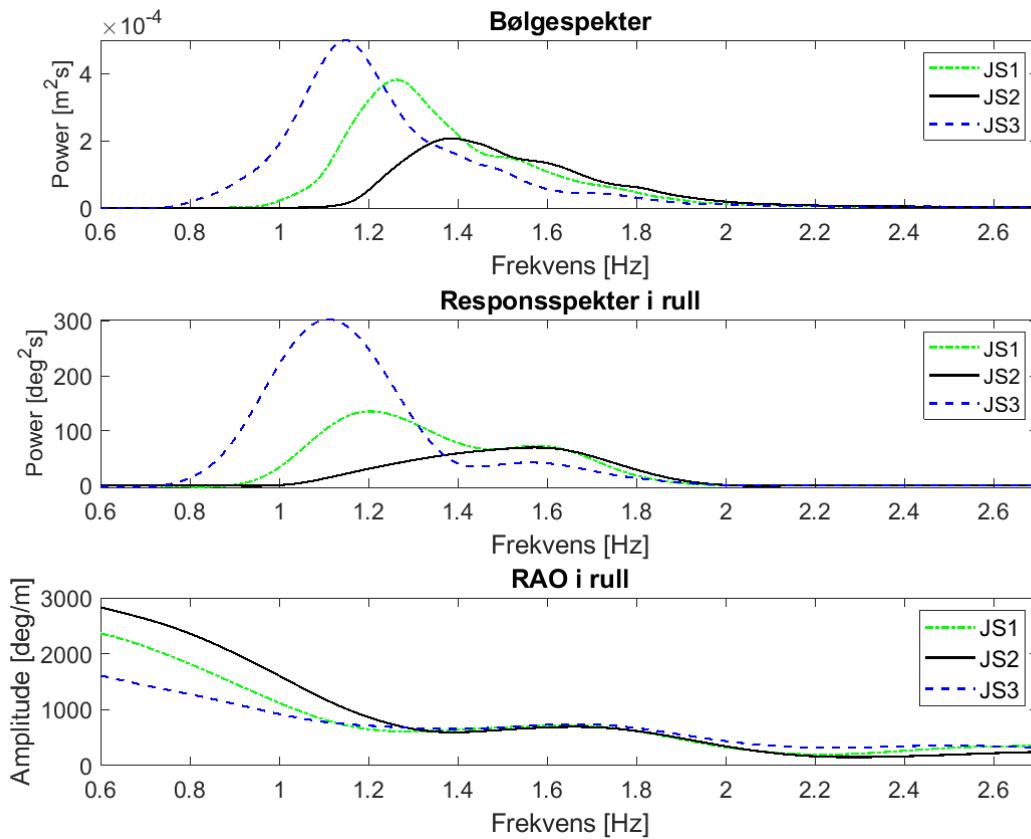
Figur 69: Oversikt over bølgespektre, responsspektre i hiv og RAO i hiv for Modell 7 i JONSWAP-1, -2 og -3

Oversikt over bølgespektrere, responspektrere i trim og RAO i trim, for Modell 7 i JONSWAP-1, -2 og -3, vises i Figur 71. Her observeres store avvik i modellens RAO i frekvenser som er lavere enn 1,3 Hz. I mindre frekvenser har modellen minst amplitude i JONSWAP-3, deretter i JONSWAP-1, mens størst amplitude observeres i JONSWAP-2. Dette har tilsynelatende en sammenheng med bølgespektrenes signifikante bølgehøyde og periode. JONSWAP-3 har størst bølgehøyde og periode, etterfulgt av JONSWAP-1, mens JONSWAP-2 har minst bølgehøyde og periode. Det kan dermed diskuteres hvorvidt det store avviket i mindre frekvenser kommer av at de lave bølgehøydene, i de lavfrekvente bølgene, forårsaker økt tilstedeværelse av støy og usikkerhet i målingene. Responspekteret i JONSWAP-3 er lavest. Dette korrelerer ikke med bølgespekterets signifikante bølgehøyde, da JONSWAP-3 har størst bølgehøyde. Det kan indikere at modellen har noe mindre respons i trim rundt perioden til JONSWAP-3.



Figur 70: Oversikt over bølgespektrere, responspektrere i trim og RAO i trim for Modell 7 i JONSWAP-1, -2 og -3

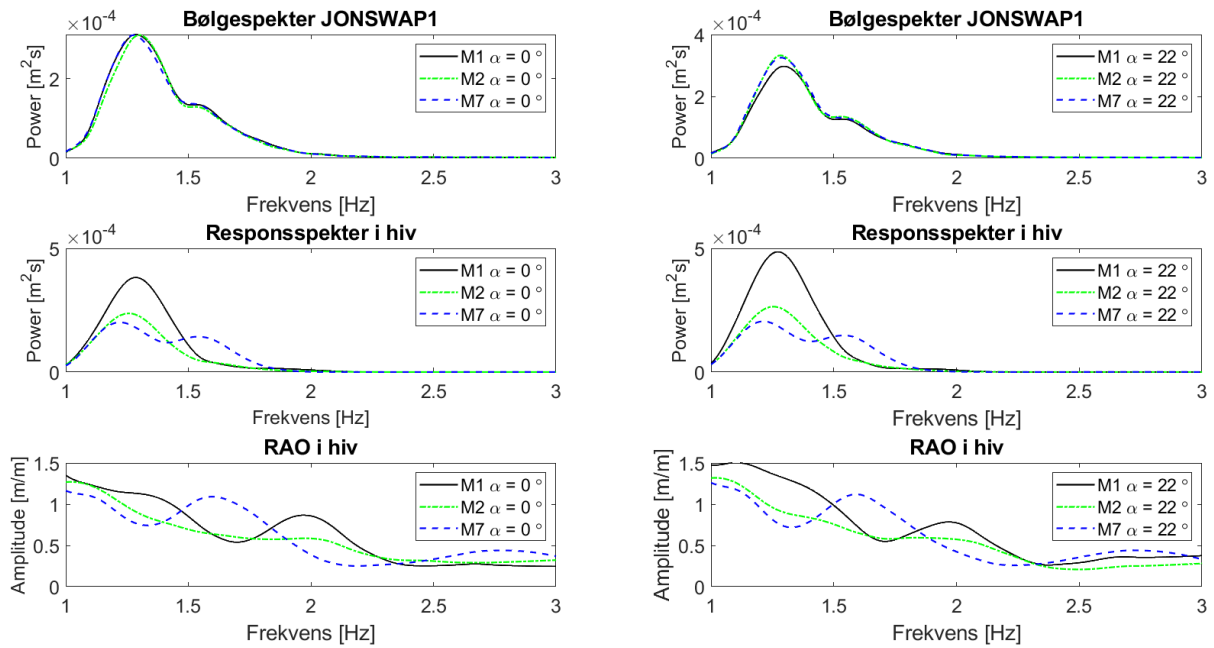
Oversikt over bølgespektrere, responsspektrere i rull og RAO i rull for Modell 7 i JONSWAP-1, -2 og -3 vises i Figur 71. Her observeres modellens RAO som relativt lik i høyere frekvenser enn 1,3 Hz. Dette har også vist seg å være tilfellet i translasjon om z-aksen og rotasjon om y-aksen. Modellens RAO i lavere frekvenser har betraktelig avvik. Det kan komme av at høyden til de lavfrekvente bølgene er så lave, spesielt i JONSWAP-1 og -2, at det fører til økt tilstedeværelse av støy og usikkerhet i målingene.



Figur 71: Oversikt over bølgespektrere, responsspektrere i rull og RAO i rull for Modell 7 i JONSWAP-1, -2 og -3

4.5.2 Eksperimentelle RAO-er for Modell 1, 2 og 7 – JONSWAP-1

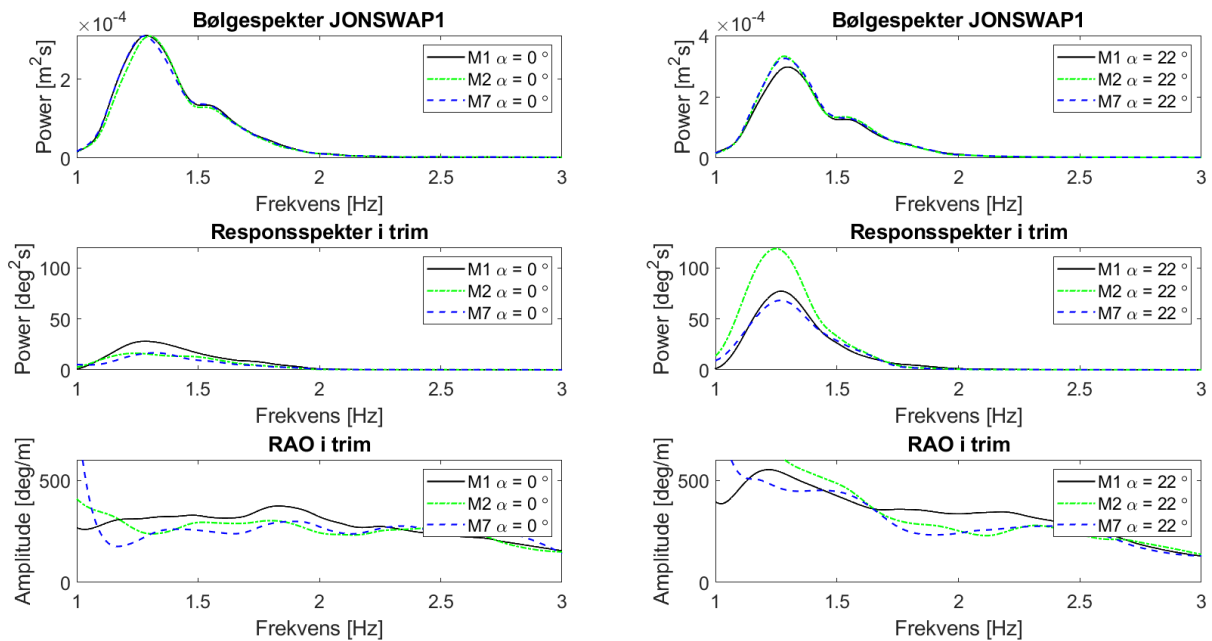
Oversikt over målte bølgespektrere, responspektrere i hiv og RAO i hiv for Modell 1, 2 og 7 i JONSWAP-1 vises i Figur 72, med 0 grader angrepsvinkel til venstre og 22 grader til høyre. Her observeres RAO-en som relativt lik, for hver modell i de to angrepsvinklene, men det bemerkes at amplituden til Modell 1 er noe større i 22 graders angrepsvinkel.



Figur 72: Oversikt over målte bølgespektrere, responspektrere i hiv og RAO i hiv for Modell 1, 2 og 7 i JONSWAP-1 med $\alpha = 0^\circ$ til venstre og $\alpha = 22^\circ$ til høyre

Oversikt over målte bølgespektrere, responspektrere i trim og RAO i trim for Modell 1, 2 og 7 i JONSWAP-1 vises i Figur 73, med 0 grader angrepsvinkel til venstre og 22 grader til høyre. Her observeres et betraktelig større responspekter, for alle modellene, ved økning av angrepsvinkel til 22 grader. Følgelig blir RAO-en til alle modellene større, i lavere frekvenser, ved økning av angrepsvinkel. Teoretisk forventes mindre respons i trim, når angrepsvinkelen overstiger 0 grader. Det er derimot ikke tilfellet i disse resultatene. Dette er en indikator på at refleksjoner i tankveggene er tilstedeværende under testing. Tilsynelatende har dette bidratt til at bølgene treffer modellene i flere retninger, utover deres innstilte angrepsvinkel.

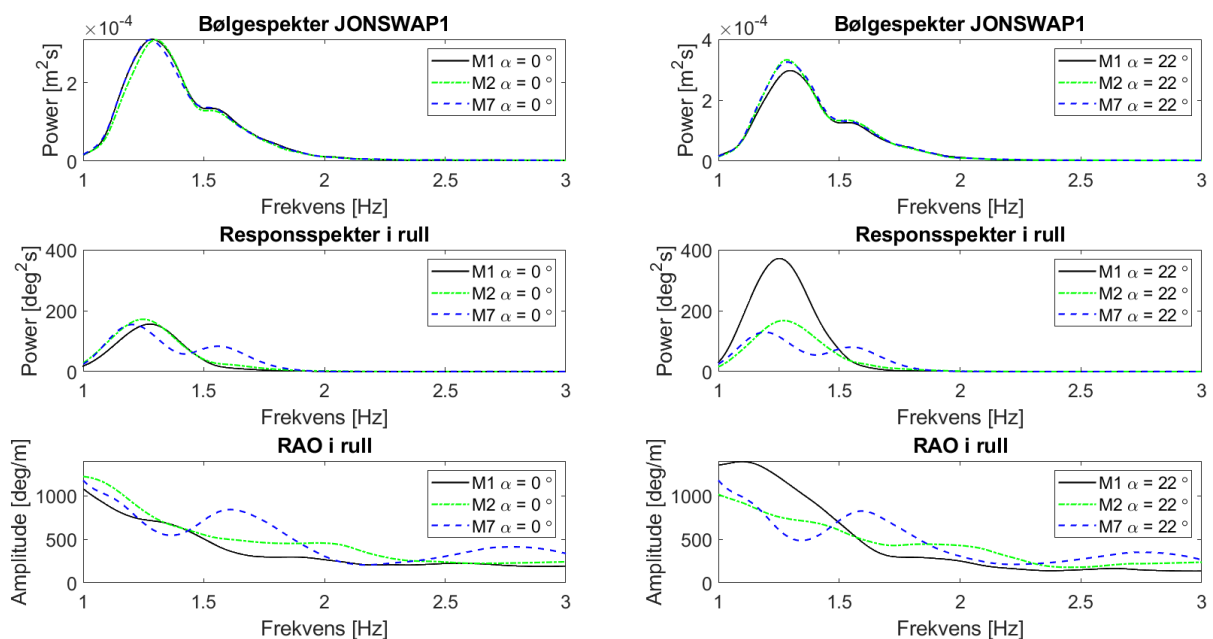
I frekvenser større enn 1,3 Hz har Modell 1 generelt størst amplitude i de representerte angrepsvinklene. Modell 2 og 7 har relativt lik gjennomsnittlig amplitude, men Modell 7 har noe mindre respons. Den betraktes dermed som noe mer stabil i trim, enn Modell 2.



Figur 73: Oversikt over målte bølgespektrere, responspektrere i trim og RAO i trim for Modell 1, 2 og 7 i JONSWAP-1 med $\alpha = 0^\circ$ til venstre og $\alpha = 22^\circ$ til høyre

Oversikt over målte bølgespektrere, responspektrere i rull og RAO i rull for Modell 1, 2 og 7 i JONSWAP-1 vises i Figur 74, med 0 grader angrepsvinkel til venstre og 22 grader til høyre. Her ser det ut til at responspekteret til Modell 1 i rull er det eneste som blir betraktelig større, ved økning av angrepsvinkel. I RAO-ene observeres også Modell 1 som den eneste modellen med tydelig endring av oppførsel i rull, ved økning av angrepsvinkel. Dette gjelder tilsynelatende kun i frekvenser mindre enn 1,4 Hz. Teoretisk forventes større amplitude i rull, for alle modellene, når angrepsvinkelen overstiger 0 grader. Ettersom dette tilfellet kun observeres for Modell 1, det en indikator på at vegg-effekter er tilstedeværende under testing. Dette i form av at bølgene treffer tankveggene og reflekteres. Det kan medføre at bølger med forskjellige angrepsvinkler, som avviker fra modellens innstilte angrepsvinkel, treffer modellene.

I høyere frekvenser enn 1,4 Hz har Modell 1 lavest amplitude, i rull, av de tre modellene. Det gjelder i begge angrepsvinklene. Følgelig har Modell 2 og 7 relativt lik gjennomsnittlig amplitude i rull, både i 0 og 22 grader angrepsvinkel.



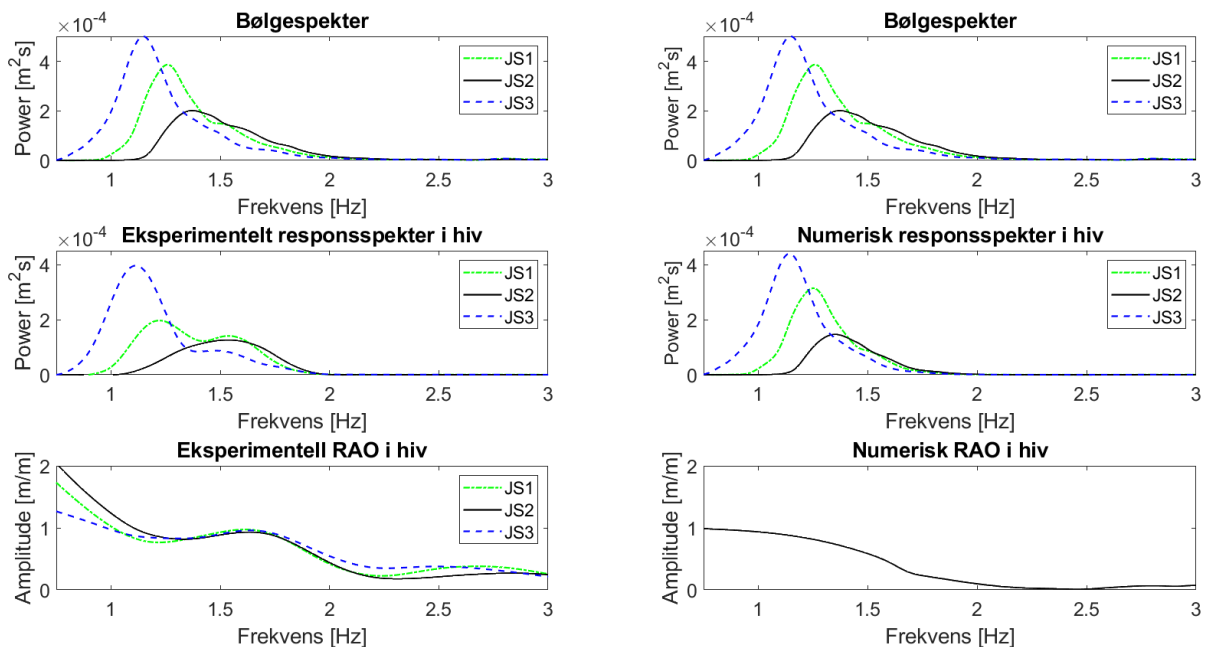
Figur 74: Oversikt over målte bølgespektrere, responspektrere i rull og RAO i rull for Modell 1, 2 og 7 i JONSWAP-1 med $\alpha = 0^\circ$ til venstre og $\alpha = 22^\circ$ til høyre

4.6 Sammenlikning av eksperimentelle og numeriske RAO-er

Numeriske og eksperimentelle responspektre og RAO-er, for Modell 7 i JONSWAP-1, -2 og -3, sammenliknes for å undersøke likheter i resultatene. Deretter sammenliknes numeriske RAO-er med eksperimentelle RAO-er for Modell 1, 2, og 7 i JONSWAP-1 i 0 og 22 grader angrepsvinkel.

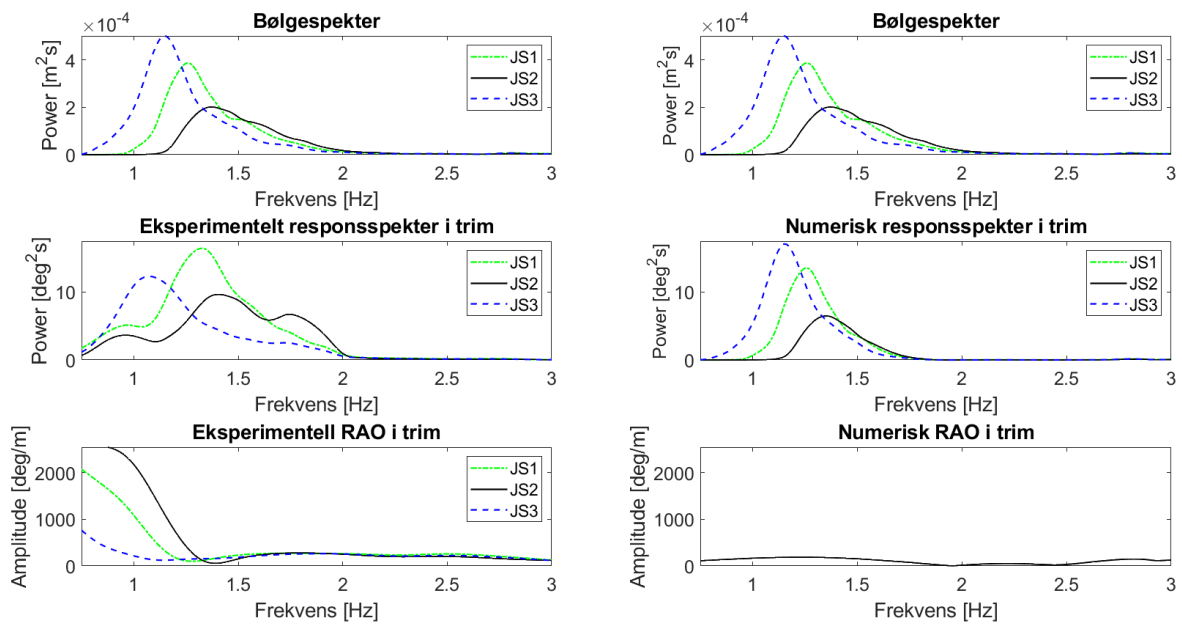
4.6.1 Eksperimentelle- og numeriske RAO-er for Modell 7

Oversikt over bølgespektre, responspektre i hiv og RAO i hiv for Modell 7 i JONSWAP-1, -2 og -3, med 0 grader angrepsvinkel vises i Figur 75. De eksperimentelle resultatene vises til venstre i figuren og de numeriske til høyre. Her observeres den eksperimentelle RAO-en som relativt lik i alle bølgespektre, i frekvenser større enn 1,3 Hz. Sammenliknet med modellens numeriske RAO, er den eksperimentelle noe større, spesielt rundt 1,65 Hz. Det kan dermed diskuteres hvorvidt den fysiske modellens forankring bidrar til økt RAO i hiv. Dessuten er egenfrekvensen, til den fysiske modellen, tilsynelatende i nærheten av 1,65 Hz. De eksperimentelle responspektrene er relativt like de numeriske, bortsett fra at de numeriske er mer konsentrerte rundt det tilhørende bølgespekterets periode. De eksperimentelle responspektrene har også slakere kurver og mer energi rundt 1,5 Hz.



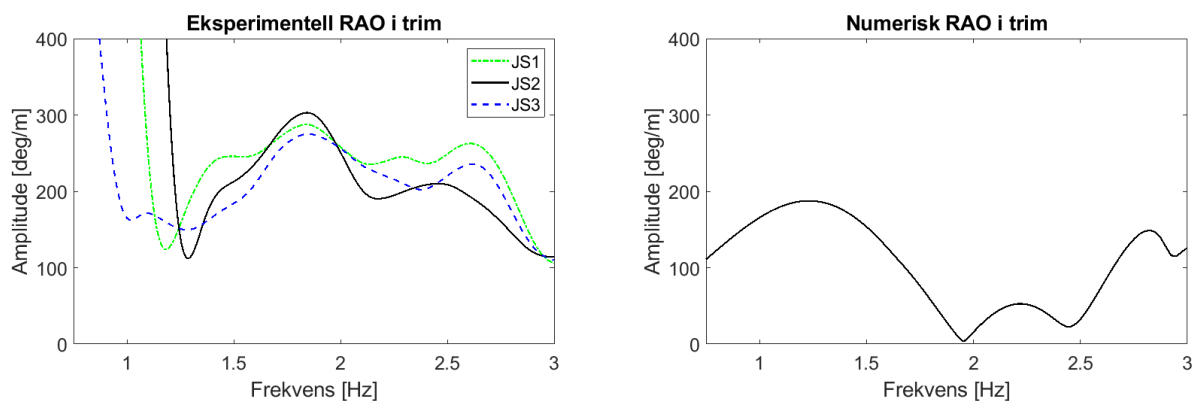
Figur 75: Oversikt over målte bølgespektre, eksperimentelle- og numeriske responspektre i hiv og RAO i hiv for Modell 7 i JONSWAP-1, -2, og -3

Oversikt over bølgespektrere, responspektrere i trim og RAO i trim for, Modell 7 i JONSWAP-1, -2, og -3, i 0 grader angrepsvinkel vises i Figur 76. De eksperimentelle resultatene vises til venstre i figuren og de numeriske til høyre. Her observeres modellens eksperimentelle RAO i trim som relativt konstant, i frekvenser større enn 1,3 Hz. Det bemerkes at det eksperimentelle responspektrere i JONSWAP-3 er betraktelig lavere enn det numeriske. Det antyder at den eksperimentelle modellen har mindre respons i trim rundt bølgespektrere periode.



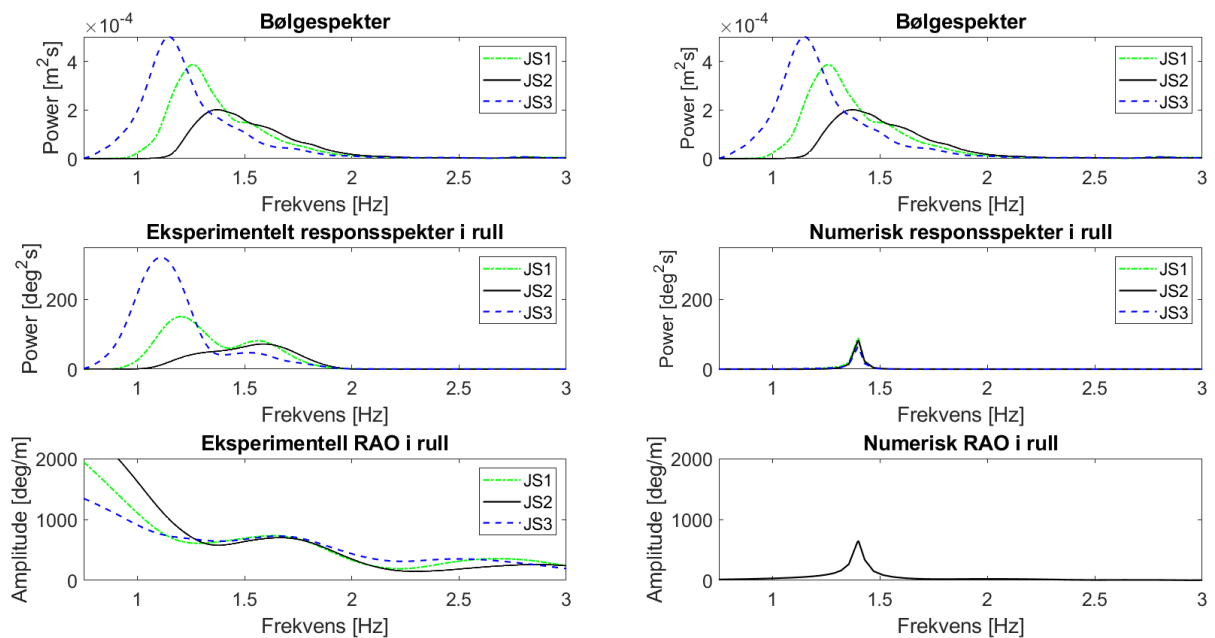
Figur 76: Oversikt over målte bølgespektrere, eksperimentelle- og numeriske responspektrere i trim og RAO i trim for Modell 7 i JONSWAP-1, -2, og -3

Et utsnitt av RAO-ene i trim vises i Figur 77. Dette for at oppførselen til RAO-ene, i høyere frekvenser enn 1,3 Hz, skal komme tydeligere frem. De eksperimentelle RAO-ene observeres generelt som noe større, enn den numeriske. RAO-ene i trim har eksperimentell og numerisk topp, henholdsvis ved omtrent 1,8 og 1,2 Hz. Det kan indikere at den fysiske modellen har mindre egenperiode i trim, muligens som følge av fortøyningen.



Figur 77: Utdrag fra eksperimentell og numerisk RAO i trim for Modell 7 i JONSWAP-1, -2, og -3

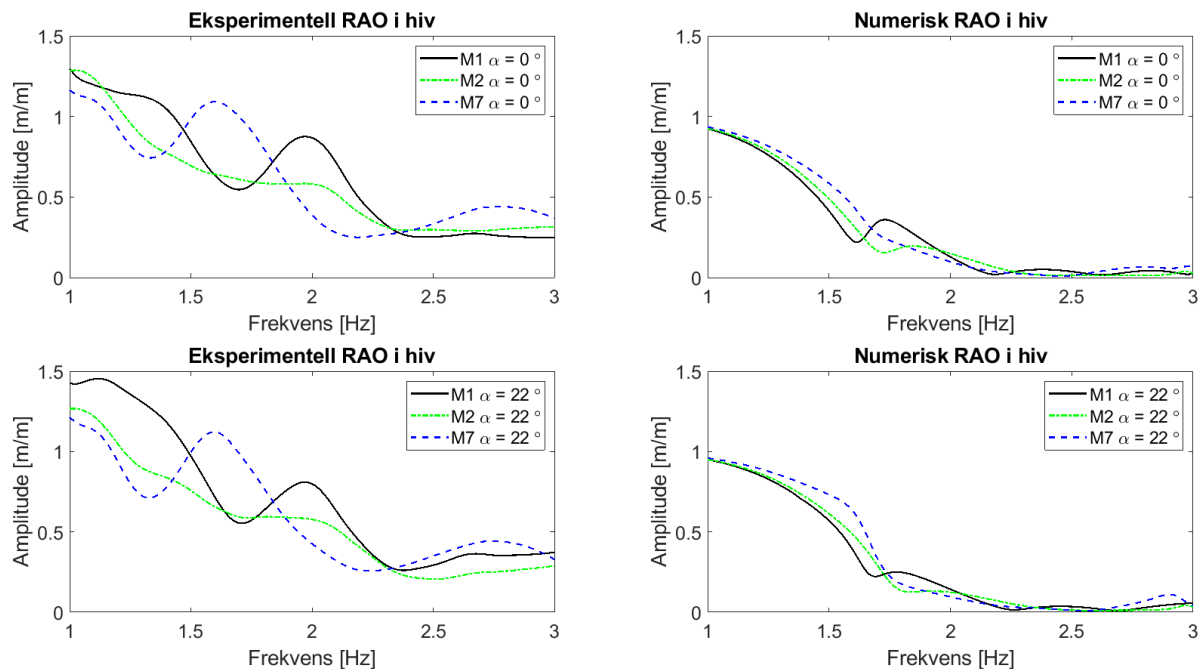
Oversikt over bølgespektrere, responspektrere i rull og RAO i rull, for Modell 7 i JONSWAP-1, -2, og -3, i null grader angrepsvinkel vises i Figur 78. De eksperimentelle resultatene vises til venstre i figuren og de numeriske til høyre. Den numeriske RAO-en observeres som svært konsentrert rundt en frekvens på omtrent 1,3 Hz. Det tilsier at denne frekvensen er den numeriske modellen sin egenfrekvens i rull. Den eksperimentelle RAO-en har topp rundt 1,7 Hz, som indikerer at modellens egenfrekvens befinner seg her. Det tilsier en kortere egenperiode, enn den numeriske. Det er mulig at dette forårsakes av det eksperimentelle fortøyningsoppsettet. Modellens eksperimentelle RAO i de forskjellige bølgespektrere er svært lik i frekvenser større enn 1,3 Hz. Modellens eksperimentelle og numeriske RAO i 1,3 Hz, er henholdsvis 590 og 440 deg/m. Den eksperimentelle RAO-en er generelt noe større, enn den numeriske, i enhver frekvens som er representert her.



Figur 78: Oversikt over målte bølgespektrere, eksperimentelle- og numeriske responspektrere i rull og RAO i rull for Modell 7 i JONSWAP-1, -2, og -3

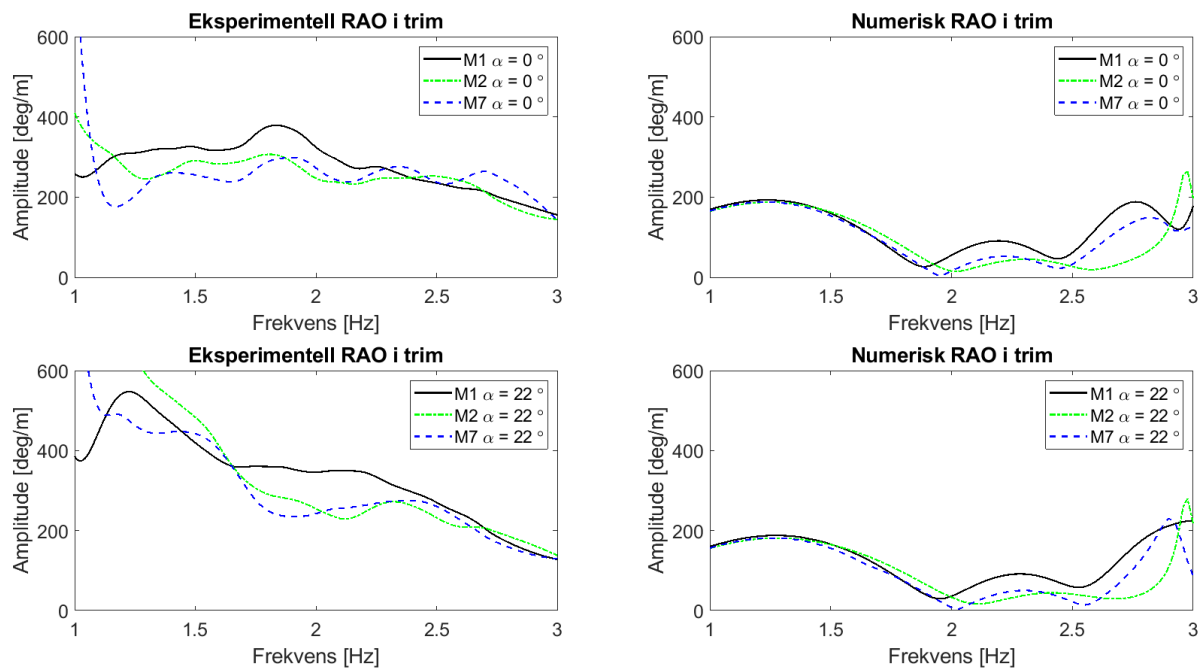
4.6.2 Eksperimentelle- og numeriske RAO-er for Modell 1, 2 og 7

Eksperimentelle og numeriske RAO-er i hiv, for Modell 1, 2 og 7 i JONSWAP-1 i 0 og 22 grader angrepsvinkel, vises i Figur 79. De eksperimentelle RAO-ene vises til venstre i figuren og de numeriske til høyre. Den eksperimentelle RAO-en i hiv er relativt like i de to angrepsvinklene, i likhet med de numeriske RAO-ene. Modell 2 har gjennomsnittlig minst amplitude i hiv, både i eksperimentelle og numeriske tilnærminger, i begge angrepsvinklene. I 0 grader angrepsvinkel er Modell 1 og 7 sin gjennomsnittlige amplitude relativt lik. Det gjelder både i numeriske og eksperimentelle resultater. I 22 grader angrepsvinkel har Modell 1 størst eksperimentell amplitude i frekvenser mindre enn 1,3 Hz. I høyere frekvenser har Modell 1 og 7 relativt lik gjennomsnittlig amplitude, både i eksperimentelle og numeriske resultater.



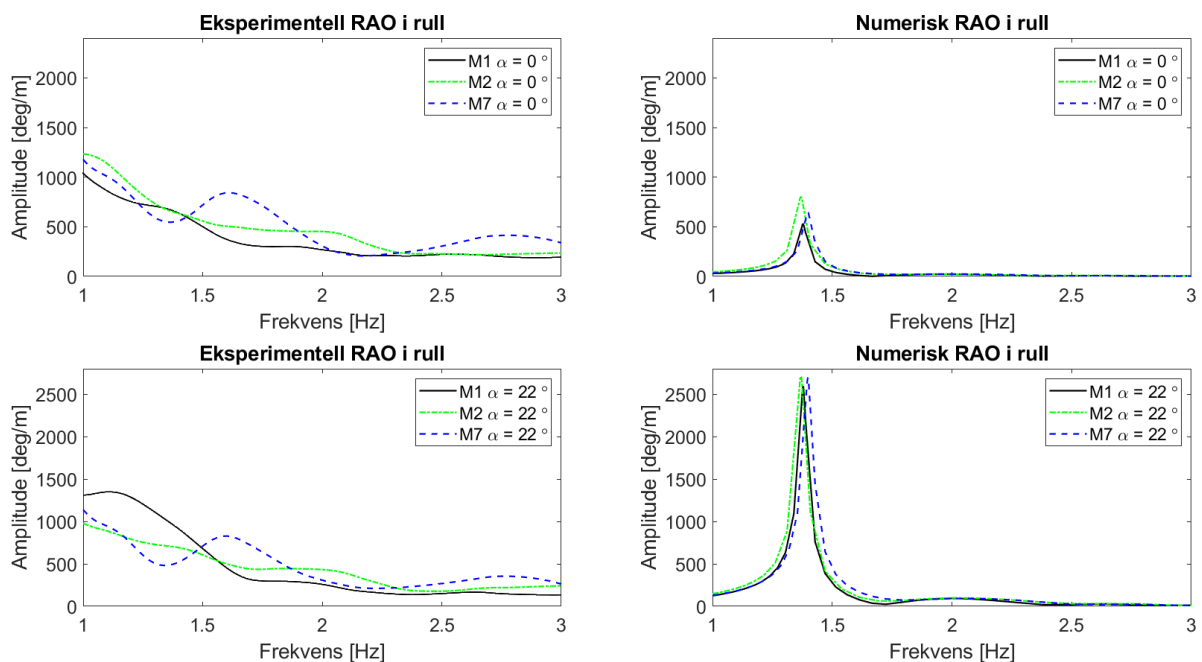
Figur 79: Eksperimentell og numerisk RAO i hiv for Modell 1, 2 og 7 i JONSWAP-1 med $\alpha = 0^\circ$ og $\alpha = 22^\circ$

Oversikt over RAO i trim, for Modell 1, 2 og 7 i JONSWAP-1 med 0 og 22 grader angrepsvinkel, vises i Figur 80. De eksperimentelle RAO-ene vises til venstre i figuren og de numeriske til høyre. Amplitudene i eksperimentelle RAO-er observeres generelt som større, enn i numeriske RAO-er. Det indikerer at veggeffekter har vært til stede under testkjøringene. Ifølge numeriske RAO-er er amplituden i trim relativt lik, i de representerte angrepsvinklene. Forskjell i RAO ved økning av angrepsvinkel fra 0 til 22 grader, er større i de eksperimentelle resultatene. Både oppførsel og omfang av numeriske og eksperimentelle RAO-er betraktes som relativt forskjellig. På tross av dette observeres en likhet, da Modell 1 relativt konsist har størst estimert amplitude i trim. Følgelig har Modell 2 og 7 relativt lik amplitude i trim. Dette er representativt i alle de estimerte RAO-ene i trim. Det tilsier at Modell 2 og 7 er omtrent like stabile i trim, mens Modell 1 er mindre stabil i trim, i de representative frekvensene.



Figur 80: Eksperimentell og numerisk RAO i trim for Modell 1, 2 og 7 i JONSWAP-1 med $\alpha = 0^\circ$ og $\alpha = 22^\circ$

Oversikt over RAO i rull for, Modell 1, 2 og 7 i JONSWAP-1 med 0 og 22 grader angrepsvinkel vises i Figur 81. De eksperimentelle resultatene vises til venstre i figuren og de numeriske til høyre. Det observeres en betraktelig økning av numerisk RAO i rull, ved økning av angrepsvinkel fra 0 til 22 grader. Dette korrelerer ikke med de eksperimentelle resultatene, bortsett fra at Modell 1 har økt amplitude i rull, i frekvenser mindre enn 1,4 Hz. Det er en indikator på at inkonsistens er til stede i de initiale angrepsvinklene til modellene. Dessuten har fortøyningsystemet til modellene trolig har bidratt til mindre respons i rull, spesielt i 22 grader angrepsvinkel. Modell 1 har tydelig minst amplitude i 0 grader angrepsvinkel. Det gjelder både i eksperimentelle og numeriske resultater. Eksperimentell RAO tilsier relativt lik amplitude for Modell 2 og 7 i 0 grader angrepsvinkel. I numeriske resultater derimot har Modell 2 tydelig større amplitude i rull, enn Modell 7. Forskjellen i modellenes numeriske RAO, i rull i 22 grader angrepsvinkel, er svært liten. Dette er relativt samsvarende med eksperimentelle RAO-er, spesielt i høyere frekvenser.



Figur 81: Eksperimentell og numerisk RAO i rull for Modell 1, 2 og 7 i JONSWAP-1 med $\alpha = 0^\circ$ og $\alpha = 22^\circ$

4.7 Numerisk RAO i lavere frekvenser

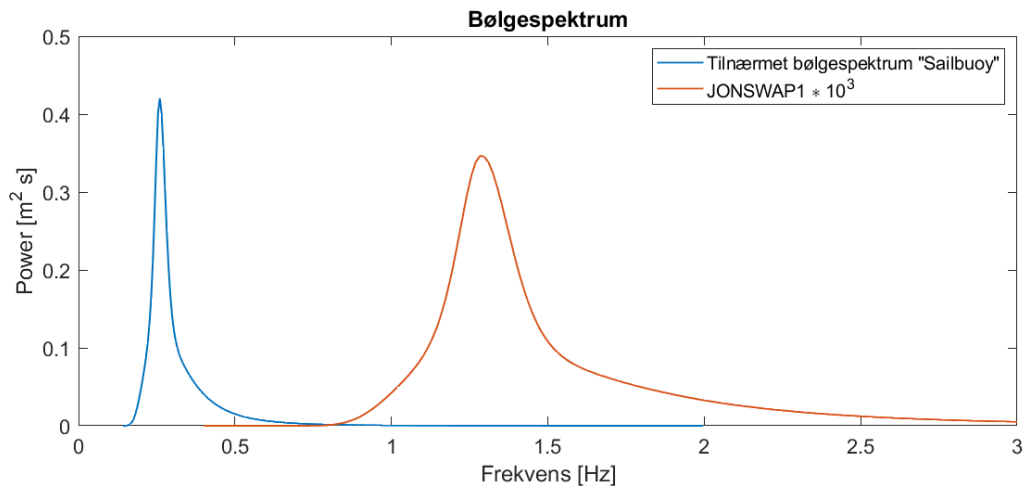
Delkapittel 1.1 presenterer responsdata i rull og trim fra feltprøver av den autonome seildronen *Sailbuoy*, som er et kartleggingssystem for fisk. Det ble ikke observert degradering av muligheten til å oppdage fiskestimer i kraftig sjø med signifikant bølgehøyde opp til 1,5 meter. Vindhastigheten var omtrent 7 m/s og gjennomsnittlig bølgehøyde 0,5 meter. Trimvinkler ble målt mellom 0,4 og 9,9 grader, og rullvinkler mellom 0,4 og 25,7 grader [6].

Delkapittel 4.4 presenterer responsdata og responsstatistikk i trim og rull, for Modell 1, 2 og 7 i JONSWAP-1 med 0 og 22 grader angrepsvinkel. Responsstatistikken til modellene er målt for gjennomsnittlig bølgehøyde på 0,0178 meter og signifikant bølgehøyde på 0,048 meter. Det tilsvarer henholdsvis 0,0356 og 0,096 meter for fullskalastrukturen. I 0 grader angrepsvinkel ble trimvinkler målt mellom 0 og 21 grader, og rullvinkler mellom 0 og 37 grader. I 22 grader angrepsvinkel ble trimvinkler målt mellom 0 og 53 grader, og rullvinkler mellom 0 og 40 grader.

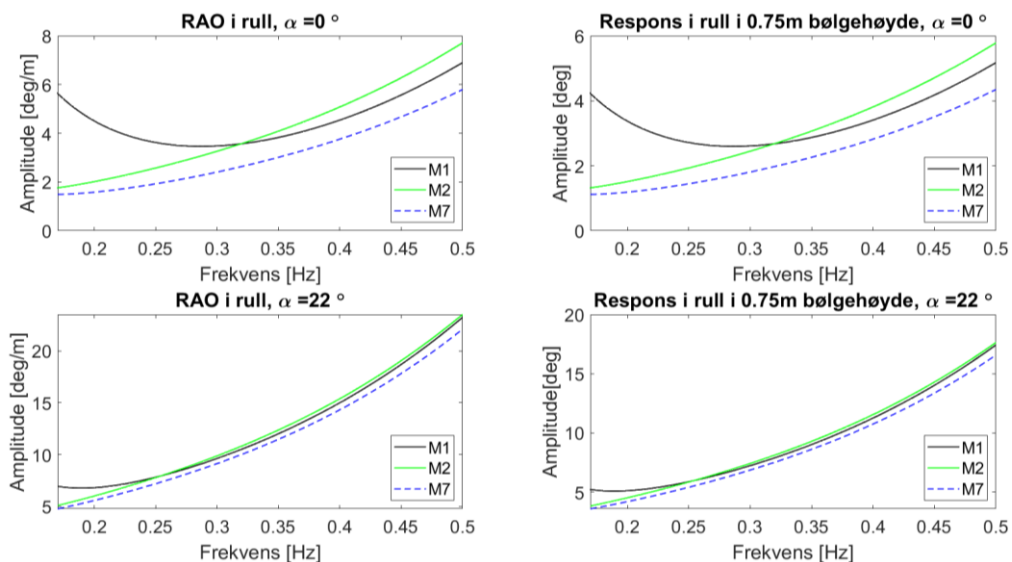
Omfanget av den målte responsen til Modell 1, 2 og 7 i trim og rull overgår trim- og rullvinkler i responsdata fra feltprøver av *Sailbuoy*. Basert på dette er det ikke tilstrekkelig å konkludere hvorvidt degradering av et ekkolodds funksjon kan forventes for Modell 1, 2 og 7. Dette ettersom de testkjørte bølgene i dette prosjektet ikke korrelerer med bølgene *Sailbuoy* ble utsatt for i feltprøver. Et JONSWAP-spekter kan tilnærmes av den signifikante bølgehøyden på 1,5 meter som *Sailbuoy* ble utsatt for under feltprøver. Den tilhørende perioden til bølgespekteret befinner seg mellom 4,41 og 6,12 s, som henholdsvis tilsvarer 0,227 og 0,163 Hz. Denne bølgetilstanden må skaleres ned med en faktor på to, for å være målbar med resultatene i dette prosjektet. Det resulterer i en signifikant bølgehøyde på 0,75 m, som gir en periode mellom 3,12 og 4,33 s, som henholdsvis tilsvarer 0,32 og 0,23 Hz. Disse frekvensene er ikke representert i resultatene i dette prosjektet. Figur 82 illustrerer dette, med en grafisk sammenlikning av bølgespektrene. JONSWAP-1 multipliseres med 10^3 , for at forskjellen skal være visuell.

På tross av at eksperimentelle RAO-er ikke er representert i frekvenser mellom 0,23 og 0,32 Hz, kan det representeres i numeriske RAO-er. Numerisk RAO, i rull i 0 og 22 grader angrepsvinkel, vises til venstre i Figur 83. Følgelig vises numerisk respons, i rull i 0,75 m bølgehøyde i 0 og 22 grader angrepsvinkel, til høyre i figuren. Ifølge de numeriske resultatene i 0 grader angrepsvinkel er responsen til modellene i rull under 6 grader. Følgelig er responsen til modellene, i rull i 22 grader angrepsvinkel, opp mot 18 grader i det representerte

frekvensdomenet. Modell 7 observeres som mest stabil i rull i begge angrepvinklene. De fremstilte responsamplitudene i rull i 0,75 m bølgehøyde vil være de samme som for fullskalastruktur i 1,5 m bølgehøyde. Ifølge de numeriske resultatene er bredden av rullvinklene i dette frekvensdomenet innenfor de samme vinklene *Sailbuoy* målte i tilsvarende bølgetilstand. Det indikerer at den numerisk beregnede responsen i rull til modellene, i det tilnærmede *Sailbuoy*-bølgespekteret, ikke vil føre til degradering av et ekkolodds funksjon [6].

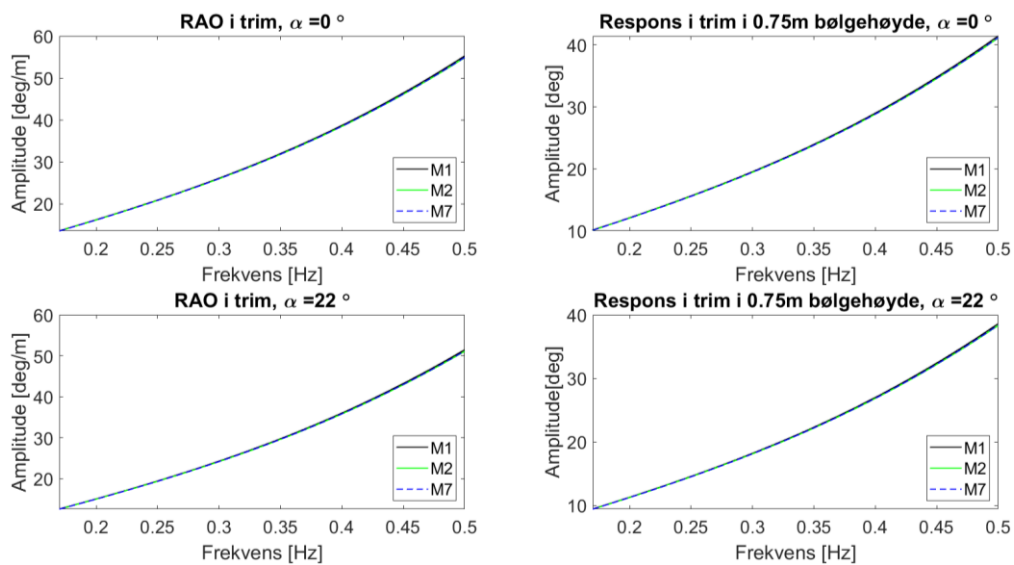


Figur 82: Tilnærmet *Sailbuoy*-bølgespektrum og JONSWAP-1 * 10³



Figur 83: Numerisk RAO i rull og respons i rull i 0,75m bølgehøyde for Modell 1, 2 og 7 med $\alpha = 0^\circ$ og $\alpha = 22^\circ$

Numerisk RAO, i trim i 0 og 22 grader angrepsvinkel, vises til venstre i Figur 84. Numerisk respons, i trim i 0,75 m bølgehøyde i 0 og 22 graders angrepsvinkel, vises til høyre i figuren. Responsen i trim observeres som svært lik for alle modellene, i de nevnte angrepsvinklene. I det representerte frekvensdomenet er responsen, i trim i 0,75 m bølgehøyde i 0 grader angrepsvinkel, estimert mellom 10 og 41 grader. Følgelig, i 22 grader angrepsvinkel, er responsen i trim estimert mellom 10 og 39 grader. Responsen tilsvarer fullskalastrukturen sin respons i 1,5 m bølgehøyde. Den estimerte bredden av trimvinkler overgår de målte trimvinklene fra feltprøver av *Sailbuoy*, i hver representativ frekvens. Basert på denne betraktningen vil responsen i trim til hver modell potensielt føre til degradering av et ekkolodds funksjon i kraftig sjø [6].



Figur 84: Numerisk RAO i trim og respons i trim i 0,75m bølgehøyde for Modell 1, 2 og 7 med $\alpha = 0^\circ$ og $\alpha = 22^\circ$

5 Konklusjon

NORCE har utviklet en USV i samarbeid med Greenfish, som skal gå autonomt i havet og utføre søk etter fisk. Den skal gå på batteri og utstyres med ekkolodd. For gunstig utnyttelse av batteri er et energieffektivt skrog hensiktsmessig. For optimal avlesning av ekkoloddet er det nødvendig at skrogets respons i trim og rull er minimal. En forenklet, nedskalert modell av USVen er utviklet, samt en modifisert modell med konvensjonell baug, spisset hekk og fordelte finner. Hver modell består av tre byttbare deler, baug, midtseksjon og hekk. Syv forskjellige kombinasjoner er testet med slepevogn, der motstand ble målt i ti forskjellige hastigheter, for redegjørelse av mest og minst energieffektive geometriske utforminger. Tre forskjellige kombinasjoner av baug, hekk og finner er testet i irregulære bølger, der RAO-er er kalkulert av bølgedata og responsdata i hiv, trim og rull. Dessuten er tilsvarende numeriske RAO-er fremstilt for modellene i Sesam. Numeriske RAO-er er også fremstilt i lavere frekvenser, som ikke er representert i de eksperimentelle resultatene.

Resultatene tilsier at eksperimentelle RAO-er er sammenlignbare i frekvenser høyere enn 1,3 Hz, da betraktelig inkonsistens observeres i lavere frekvenser.








Den numerisk beregnede responsen til modellene i trim i 0,75 m bølgehøyde, i et tilnærmet *Sailbuoy*-bølgespekter, indikerer at degradering av et ekkolodds funksjon kan forventes.

Resultatene oppsummeres i Tabell 27 med illustrasjon av modellene og rangering av energieffektivitet og stabilitet i trim og rull. Mørk grønn og karakter 5 indikerer mest energieffektiv og mest stabil. Mørk oransje og karakter 1 indikerer minst energieffektiv og minst stabil. Gul og karakter 3 indikerer at modellens estimerte motstand og stabilitet, både i trim og rull, er relativt nøytral i rangeringen. Basert på dette betraktes Modell 4 som mest energieffektiv, etterfulgt av Modell 1 og 7. Modell 2 og 6 vurderes som verken mer eller mindre energieffektive. Modell 3 observeres som minst energieffektiv, etterfulgt av Modell 5. I rull betraktes Modell 1 som mest stabil, men minst stabil i trim. Modell 2 rangeres som minst stabil i rull og middels stabil i trim. Modell 7 vurderes som mest stabil i trim og middels stabil i rull. Modell 7 og 2 har henholdsvis det mest og minst hensiktsmessige designet, henholdsvis på grunn av høyest og lavest sum av de angitte karakterene, både i motstand og stabilitet.

Avslutningsvis kan det konkluderes med at endring av den runde baugen til mer en konvensjonell utforming, medfører større motstand under fremdrift. Spisset hekk derimot bidrar til mindre motstand, både som baug og hekk. De fordelte finnene bidrar til økt stabilitet i rull, da modellene med finner er de mest stabile i rull. De fordelte finnene bidrar til økt motstand

under fremdrift, men har tilsynelatende mindre motstand når de kombineres med den konvensjonelle baugen og spissede hekken.

Tabell 27: Rangering av energieffektivitet og stabilitet i trim og rull

Navn	Bilde (← Baug/Hekk →)	Energieffektiv	Stabil i trim	Stabil i rull
Modell 1		4	1	5
Modell 2		3	3	1
Modell 3		1		
Modell 4		5		
Modell 5		2		
Modell 6		4		
Modell 7		3	5	3

6 Videre arbeid

Geometrisk utforming av hekk, baug og finner har tilsynelatende en betydelig effekt på USVens motstand under fremdrift. Disse utformingene hadde noe mindre påvirkning i estimert stabilitet, da ingen av modellene utmerket seg med minst respons i hver representativ frihetsgrad. Det indikerer at forskjellen i de geometriske utformingene ikke er tilstrekkelige for en betraktelig endring av respons, både i rull og trim.

Til videre arbeid er det interessant å undersøke om de fordelte finnene bidrar til mindre motstand under fremdrift i bølger. Det vil også være hensiktsmessig å utføre slepetester der vannlinjelengden beholdes konstant, slik at den bølgedannede motstanden også holdes konstant. Videre vil det være interessant å fremstille tilsvarende numeriske resultater for de utførte slepetestene. Så snart numeriske beregningsverktøy er validert med eksperimentelle resultater i lave hastigheter, kan verktøyet brukes til ytterligere analyser i høyere hastigheter. For ytterligere kunnskap om de geometriske utformingene kan det være interessant å teste flere kombinasjoner av baug-, hekk- og finnegeometri under fremdrift.

Oppsummert indikerte ikke stabilitetsestimatet at en av modellene hadde minst respons i hver representativ frihetsgrad. Hvilken modell som hadde minst respons varierte med frihetsgrad og bølgens angrepsvinkel. Til videre arbeid i forskning på et mer stabilt skrog vil det være interessant å undersøke større forskjell i geometrisk utforming.

I videre arbeid vil det også være interessant å teste modellene i bølgespektre som er representative i lavere frekvenser, for sammenlikning med numeriske RAO-er i mindre frekvenser. Dette for å validere konklusjonen om at modellene var tilstrekkelig stabile i rull, men ikke stabile nok i trim. Dette knyttet til *Sailbuoy* sin responsdata.

7 Referanser

- [1] R.W.D. Davies, S.J. Cripps, A. Nickson og. G Porter. "Defining and estimating global marine fisheries bycatch." *Marine Policy* 33, no. 4 (2009): 661-672.
- [2] Offshore sensing AS. *Gallery*.
<http://sailbuoy.no/gallery>
Hentet 15.04.2020.
- [3] Andreas Nilsen Trygstad. *Mener havdrone kan revolusjonere fiskerinaeringa og spare miljøet*. NRK, 2018.
<https://nrk.no/nordland/mener-havdrone-kan-revolusjonere-fiskerinaeringa-og-spare-miljoet-1.14357511>
Hentet 10.03.2020
- [4] Camilla Aadland. *Denne dronen skal hjelpe fiskere lete etter fisk*. Tekfisk, 2018
<https://fiskeribladet.no/tekfisk/nyheter/?artikkel=64241>
Hentet 10.03.2020
- [5] NamHyun Yoo. "A Study of an Unmanned Surface Vehicle System for Marine Environmental Monitoring." In *Advanced Multimedia and Ubiquitous Engineering*, pp. 364-369. Springer, Singapore, 2019.
- [6] R. Hauge, G. Pedersen og E. Kolltveit. "Fish finding with autonomous surface vehicles for the pelagic fisheries." In *OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey*, pp. 1-5. IEEE, 2016.
- [7] Z.A. Fauzan, A. Triwiyatno, B. Sasmito og M.H. Nubly. "Intact stability and seakeeping characteristics of autonomous surface vehicle (asv) using swath hullform to support bathymetry survey activities on the coastal area." In *MATEC Web of Conferences*, vol. 177, p. 01001. EDP Sciences, 2018.
- [8] J. Wang, W. Gu og J. Zhu. "Design of an autonomous surface vehicle used for marine environment monitoring." In *2009 International Conference on Advanced Computer Control*, pp. 405-409. IEEE, 2009.
- [9] J.M.J. Journèe og W.W. Massie. *Offshore Hydromechanics*. Delft University of Technology, 2001.

- [10] K. Tabri, J. Määttänen, og J. Ranta. "Model-scale experiments of symmetric ship collisions." *Journal of marine science and technology* 13, no. 1 (2008): 71-84.
- [11] DNV GL. *Environmental conditions and environmental loads*, DNV-RP-C205, oktober 2010.
- [12] Anthony F. Molland. *The Maritime Engineering Reference Book*. Butterworth-Heinemann, 2008.
- [13] Peter Aird. *Deepwater Drilling*. Elsevier, 2019
- [14] Thomas Skinlo Høyven. "Bending moments and collision loads between a floating offshore wind turbine and a supporting barge." Masteroppgave, Universitetet i Bergen, 2019.
- [15] Z. Segal og A. Segal. "Roll stabilization with short wings." *Naval Engineers Journal* 123, no. 1 (2011): 45-54.
- [16] Westen Norway University of Applied Sciences. *MarinLab*.
<https://www.hvl.no/en/about/marinlab/>
Hentet 10.04.2020
- [17] DNV GL. *Software Products Overview*.
<https://www.dnvgl.com/software/products/sesam-products.html>
Hentet 19.03.2020
- [18] Autodesk. *Inventor Overview*.
<https://www.autodesk.com/products/inventor/overview>
Hentet 19.03.2020
- [19] Edinburgh Designs. *Wave Generating Software*.
<http://www4.edesign.co.uk/product/wave-generating-software/>
Hentet 19.03.2020
- [20] Qualisys. *We are Qualisys. The Swedish motion capture company*.
<https://www.qualisys.com/about/>
Hentet 19.03.2020

- [21] National Instruments. *What is LabVIEW*.
<https://www.ni.com/en-no/shop/labview.html>
Hentet 19.03.2020
- [22] MathWorks. *MATLAB Primer*. The MathWorks Inc, versjon R2015b, 2015.
- [23] Odd Marius Stubbe Glesnes. "Bending moments and collision loads between a floating offshore wind turbine and a supporting barge." Masteroppgave, Universitetet i Bergen, 2019.

Vedlegg

Ved innlevering av denne oppgaven har vedlegg blitt lastet opp via Studentweb.

Vedlagt er sat-filer til de testede modellene, med følgende filnavn.

Modell1.sat

Modell2.sat

Modell3.sat

Modell4.sat

Modell5.sat

Modell6.sat

Modell7.sat