

Eksperimentell hydrodynamisk testing av en USV-modell

Oliver M. Amland
Filip K. Thorsen

Bacheloroppgave i Marinteknikk
Bergen, Norge 2023



Eksperimentell hydrodynamisk testing av en USV-modell

Oliver M. Amland
Filip K. Thorsen

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

IMM 2023-M30

Høgskulen på Vestlandet
Institutt for Maskin- og Marinfag
Inndalsveien 28,
NO-5063 Bergen, Norge

Cover and backside images © Norbert Lümmer

English title: Experimental hydrodynamic testing of an USV model

Forfatter(e), studentnummer: Oliver M. Amland 591404
Filip K. Thorsen 591400

Studieprogram: Marinteknikk
Dato: Mai 2023
Rapportnummer: IMM 2023-M 30
Veileder ved HVL: Gloria Stenfelt
Oppdragsgiver: DeepOcean AS
Oppdragsgivers referanse: Maria Teige

Antall filer levert digitalt: Ingen

Forord

Denne bacheloroppgaven er gjennomført på Høgskulen på Vestlandet (HVL) i Bergen, på studieretningen Marinteknikk ved Institutt for Maskin- og Marinfag (IMM) i samarbeid med DeepOcean AS. Oppgaven går ut på å studere bevegelsesresponsen til en «Unmanned Surface Vehicle» (USV) i ulike bølgeretninger og kartlegge når det er best å sjøsette og trekke inn en «Remotely Operated Vehicle» (ROV) for å redusere risikoen for kollisjon mellom disse.

Takk til vår interne veileder Gloria Stenfelt, førsteamanuensis ved HVL, for god veiledning og hjelp til prosjektet gjennom hele semesteret. Vi vil også takke vår eksterne veileder Maria Teige, Technology Engineer i DeepOcean, for god veiledning og hjelp.

Vi ønsker å takke Nafez Ardestani, avdelingsingeniør ved IMM på HVL for hjelp med fresing av modellen. Også en takk til Anders Haga, Lead Engineer (Structures) i DeepOcean for rask hjelp med 3D-printing til modellen.

Gruppen har bidratt til en annen studentgruppe på studieretningen Automatisering med robotikk på HVL i Haugesund. Studentgruppen ved dette studiet har på MarinLab i Bergen testet sitt utstyr på USV-modellen.

Bacheloroppgaven er i tråd med satsingsområdet «Ren energi og maritim fremtid» i Rogaland Fylkeskommunes nærings- og innovasjonsstrategi, da prosjektet bidrar til utvikling som er viktig for det grønne skiftet. Prosjektet har derfor blitt tildelt virkemidler i form av penge støtte.

DEEPOCEAN



Sammendrag

Subsea-operasjoner gjennomføres i dag med skip med lengder opp til 150m som kan ha en bemanning på opp mot 140 personer. Med nyskapende tenkning kan både bemanningen offshore og det totale karbonavtrykket reduseres ved å bygge mindre fartøy som kan utføre operasjoner med «Remotely Operated Vehicle» (ROV) fra land.

DeepOcean utvikler i samarbeid med Remota en «Unmanned Surface Vehicle» (USV) som skal operere en ROV. Både USV og ROV skal fjernstyres fra samme kontrollrom hvor operatører og førere sitter på land. Dette er en del av det grønne skiftet som vil føre til redusert karbonavtrykk på operasjoner som utføres offshore.

Målet med oppgaven er å finne bevegelsesresponsen til USV'en og vurdere hvilke bølgeretninger det er tryggest å sjøsette og trekke opp ROV'en for å unngå kollisjon. I den forbindelse bygges en skalert modell av USV'en (1:20) som det gjennomføres seakeeping-tester for. Testingen finner sted på MarinLab ved Høgskulen på Vestlandet i Bergen. Før seakeeping-testene utføres det decay-tester for å identifisere egenperiodene til fortoyningssystemet. Verdiene i hiv og stamp er i dette tilfellet noe utfordrende å evaluere, da modellen i disse frihetsgradene dempes veldig raskt.

Når egenperiodene er identifisert utføres seakeeping-tester for innkommende bølgeretninger varierende fra 0° til 90° . Resultatene viser at det mest gunstige for å unngå kollisjon mellom USV og ROV er å sjøsette og trekke inn ROV'en når USV'en står mellom 0° og 15° relativt til innkommende bølger. Teoretiske resultater fra SINTEF har mange fellestrekk med de eksperimentelle resultatene, noe som er med på å underbygge troverdigheten til resultatene i dette prosjektet.

Abstract

The subsea operations performed today are carried out using large vessels with up to 150m length that can hold a crew of 140 people. With innovative thinking, offshore crew can be reduced and the overall carbon footprint can be decreased by building smaller vessels capable of performing operations with «Remotely Operated Vehicles» (ROVs) controlled from control rooms onshore.

DeepOcean and Remota are collaborating on the development of an «Unmanned Surface Vehicle» (USV) equipped with an onboard ROV. The USV and ROV will be controlled remotely from the same control room, with operators and navigators located onshore. This is part of the green transition that will lead to a reduced carbon footprint for offshore operations.

The purpose of the task is to determine the motion response of the USV and evaluate for which wave directions relative to the USV it will be safest for launch and recovery of the ROV. In this regard, a scaled model of the USV (1:20) is being built for seakeeping tests. The testing will be performed at MarinLab, Western Norway University of Applied Sciences in Bergen.

Prior to the seakeeping tests, decay tests are performed to identify the natural frequencies of the mooring system. Evaluating the values of heave and pitch is a bit challenging in this case, as the model experiences rapid damping in these degrees of freedom.

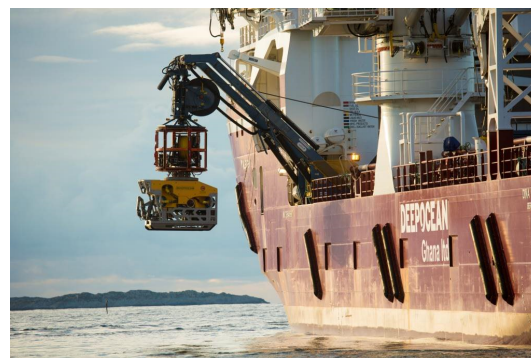
Once the natural frequencies are identified, seakeeping tests are performed in incoming wave directions ranging from 0° to 90° . The results show that the most favorable conditions to avoid the risk of collisions is to launch and recover the ROV when the USV is oriented between 0° and 15° relative to the incoming waves. These experimental results have similarities with the theoretical findings from SINTEF, reinforcing the reliability of the results in this project.

Innhold

Forord	i
Sammendrag	iii
Abstract	v
1 Innledning	1
2 Metode	3
2.1 Testplan og geometri	3
2.2 Bygging av modell	5
2.3 Ballastering og krengeprøve	7
2.4 Testoppsett	9
2.4.1 Fortøyningsoppsett	11
2.4.2 Decay-tester	13
2.4.3 Seakeeping-test	14
2.5 Feilkilder	15
3 Resultat	16
3.1 Systemrespons	16
3.2 Respons USV	17
3.2.1 Jag, svai og gir	17
3.2.2 Hiv	19
3.2.3 Stamp	21
3.2.4 Rull	24
3.3 Teoretiske resultater SINTEF	26
4 Konklusjon	27
Referanser	28
Vedlegg	29

1 Innledning

Subsea-operasjoner blir i dag gjennomført med skip som har opp til 150m lengde med en bemanning på opp mot 140 personer. Fartøyene er utstyrt med mye utstyr som kran, «Module Handling System» (MHS) og 2-3 «Remotely Operated Vehicles» (ROV). Mange operasjoner som gjennomføres krever mindre utstyr og kan derfor utføres med et betydelig mindre fartøy som har bedre miljøprofil og lavere driftskostnad. I tillegg kan man med nyskapende tenkning og ny teknologi designe båter som kan fjernstyres og utføre ROV-operasjoner kontrollert fra land. Dette har ført til utvikling av nye fartøydesign for mindre fartøy som ikke trenger sengeplasser, oppholdsrom, messe osv. da det ikke er mennesker om bord for å navigere fartøyet eller for utførelse av operasjoner. Utfordringen med disse fartøyene er blant annet at de vil bevege seg annerledes enn fartøyene som brukes i industrien i dag. De nye fartøyene vil være mellom 24-30m. Etter mange års erfaring er det opparbeidet gode fartøydesign og rutiner for å sjøsette og ta opp ROV fra sjøen og man kjenner fartøyenes bevegelse i Nordsjøen. Derimot finnes det lite forskningsdata eller reelle eksempler på fartøy under 30m som sjøsetter ROV i Nordsjøen. Motivasjonen for denne oppgaven er å undersøke hvordan et USV-design vil oppføre seg i sjøtilstander typisk for Nordsjøen og vurdere når det er forsvarlig å sjøsette/ trekke inn en ROV uten at den tar skade.



Figur 1: Edda Fauna - Tradisjonelt konstruksjonsfartøy [1] Figur 2: Dina Star - Metode for sjøsetting av ROV [1]

DeepOcean AS er en verdensledende, teknologidrevet og uavhengig løsningsleverandør i havrommet. Selskapet jobber for å muliggjøre energiomstilling og bærekraftig bruk av havressursene ved å tilby selskaper et spekter av tjenester innen olje og gass, offshore fornybar energi, dyphavsmineraler og andre ikke-energinisjer. DeepOcean søker kontinuerlig etter å gjøre kundenes virksomhet og tjenester mer bærekraftig, gjennom å redusere både karbonavtrykk og kostnader.

Selskapet har en lang historie med å utfordre industrien med innovativ bruk av ROV'er og har en verdensledende merittliste når det gjelder å finne metoder å utføre undervannsarbeid ved bruk av fjernteknologi.

Med selskapets toppmoderne løsninger for dypvannsoperasjoner, er DeepOcean i forkant av fjernstyrte og ubemannede operasjoner. DeepOcean sitt «Remote Operation Center» (ROC) lar dem betjene ROV'er plassert på offshorefartøy fra kontrollrom i Haugesund. Dette gir store fordeler som økt fleksibilitet, samtidig drift, reduserte kostnader med færre arbeidere offshore, redusert HMS-eksponering, samt redusert karbonavtrykk.

De siste årene har DeepOcean sett på muligheten for å bruke mindre og ubemannede fartøy til å gjøre mye av det samme arbeidet som dagens flåte gjør. I bransjen kalles dette for en «Unmanned Surface Vehicle» (USV). I USV-markedet finnes det allerede utenlandske bedrifter som selger konsepter av design. DeepOcean ser det nødvendig å konkurrere med disse bedriftene i å designe et fartøy for å holde sin posisjon i offshore olje- og gassmarkedet, samt styrke posisjoner innen offshore vind. For at dette konseptet skal fungere må ROV'er som brukes i dag for å gjennomføre inspeksjoner av subsea installasjoner, offshore vindparker og interkontinentale kraftkabler, sjøsettes automatisk. DeepOcean ønsker å bruke denne oppgaven for å få bedre innsikt og forståelse i et USV-design sine bevegelser og når det kan være trygt å sjøsette/ trekke inn ROV. [1]

Denne rapporten er ikke en fortsettelse på tidligere forskning, men SINTEF har på vegne av DeepOcean utført en numerisk analyse av USV'en i en tidligere fase av designet. Modellen som testes i dette prosjektet baserer seg på et nyere design og vil derfor ikke ha de nøyaktig samme egenskapene. Rapporten fra SINTEF vil likevel brukes til sammenligning for å undersøke om de har likhetstrekk med de eksperimentelle resultatene [2].

Hovedmålet med oppgaven er å finne bevegelsesresponsen til USV'en som DeepOcean har designet for ubemannede offshore operasjoner og vurdere når det er tryggest å sjøsette og trekke inn ROV'en under operasjon. DeepOcean ønsker å minimere kollisjonsskader mellom USV og ROV under sjøsettingen og opphenting.

For å vurdere dette skal det i dette forsøket sees på hvilke bølgeretninger i ulike irregulære sjøtilstander som er mest gunstig for sjøsettingen og innhenting av ROV'en. Forsøket utføres så godt det lar seg gjøre i henhold til «International Towing Tank Conference» (ITTC) sine retningslinjer [3].

Hovedmålet skal nås gjennom følgende delmål:

Delmål 1: Bygge en skalert modell av USV'en.

Delmål 2: Bekrefte modellens stabilitet i henhold til design.

Delmål 3: Utføring av seakeeping-tester av modellen i ulike sjøtilstander typisk for Nordsjøen.

Delmål 4: Analyse av responsen til fartøyet og sammenligning med teori.



Figur 3: Modell av USV fortøyd i MarinLab ved Høgskulen på Vestlandet

2 Metode

Dette kapitlet presenterer fremgangsmåten som brukes i prosjektet. Første delkapittel beskriver forsøksmodellen og testplan. Videre forklares byggeprosessen, etterfulgt av fremgangsmåte for ballasting og krengeprøve. Deretter beskrives testoppsett, samt prosedyre for decay- og seakeeping-tester. Avslutningsvis presenteres mulige feilkilder.

2.1 Testplan og geometri

Testingen av modellen finner sted i MarinLab på HVL i Bergen [4]. Modellen testes i totalt seks ulike sjøtilstander som er typiske for Nordsjøen. Disse sjøtilstandene blir undersøkt under fem forskjellige bølgeretninger fra 0° til 90° . Tabell 1 angir sjøtilstandene for modellforsøket. H_s er signifikant bølgehøyde og beskriver den gjennomsnittlige høyden til den høyeste tredjedelen av bølgene i et bølgespekter. T_p er bølgeperiode og γ (gamma) er en dimensjonsløs spredningsparameter. En fullskala seakeeping test har en varighet på 3 timer, men nedskalert har den en varighet på 40 minutter. For å få et komplett sett med måledata kjøres hver sjøtilstand i 45 minutter slik at start- og slutt-data kan kuttes bort. Bølgespekteret som brukes er JONSWAP-bølgespekter som er basert på observasjoner av bølger i Nordsjøen og er derfor gunstig å bruke i dette forsøket. Spekteret viser energifordelingen som funksjon av frekvens og defineres etter standard fra DNV [5].

H_{sUSV} [m]	T_{pUSV} [s]	$H_{sModell}$ [m]	$T_{pModell}$ [s]	γ [*]
2	7	0.1	1.565	3.3
2	9	0.1	2.0125	3.3
2	11	0.1	2.4597	3.3
3.5	7	0.175	1.565	3.3
3.5	9	0.175	2.0125	3.3
3.5	11	0.175	2.4597	3.3

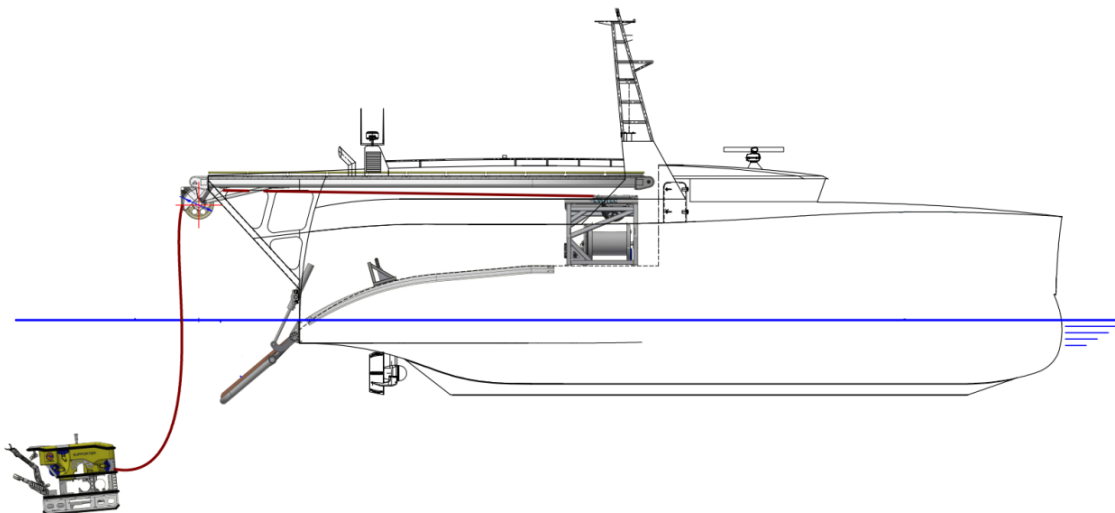
Tabell 1: Testmatrise. Testes for 0° , 15° , 30° , 60° , 90° og kjøres 45 min hver

Tabellen under viser vannets temperatur, viskositet og tetthet i slepetanken. Sjøvann og ferskvann har ulik tetthet, noe som må tas i betraktning da modellen testes i ferskvann. Tettheten til sjøvann antas å være 1025 kg/m^3 . Tetthetsforholdet blir dermed 0.975 (Se Tabell 2). For å oppnå riktig massedeplassment multipliseres tetthetsforholdet med nedskalert modellmasse. Se Tabell 3 for korrekt massedeplassment.

Temperatur [$^\circ\text{C}$]	Viskositet [$\text{Pa} \cdot \text{s}$]	Tetthet [kg/m^3]
15.4	0.001126	999.0414

Tabell 2: Forhold i tanken [6]

Figuren nedenfor viser skisse av USV'en i operasjon. I dette prosjektet forenkles modellen ved å ikke inkludere overbygg, men den ballasteres som om det er til stede for å opprettholde realistiske ballastforhold.



Figur 4: Skisse av USV [1]

Data	USV	Modell
Total lengde	26.90 m	1.225 m (Uten overbygg)
Lengde fra kjøll til baug	22.40 m	1.12 m
Bredde	6.50 m	0.325 m
Maks bredde	7.50 m	0.375 m
Dybde	3.00 m	0.15 m
Gjennomsnittlig dybde	1.95 m	0.098 m
Dybde til vannlinje - Senter ror (X=0.00m)	1.97 m	0.099 m
Dybde til vannlinje - Baug (X=21.5m)	1.95 m	0.098 m
Trim (hekk)	-0.02 m	-0.001 m
Krengvinkel	0.0°	0.0°
\overline{KM}	3.47 m	0.174 m
\overline{KG}	2.93 m	0.147 m
\overline{GM}	0.53 m	0.027 m
Fribord	0.10 m	0.005 m
Massedepasement	223 500 kg	27.23 kg
LCG	8.33 m	0.417 m
TCG	0.00 m	0.00 m
VCG	2.93 m	0.147 m
R44	2.63 m	0.1315 m
R55	5.6 m	0.280 m

Tabell 3: USV-data

For at modellen skal oppnå best mulig tilnærming til fullskala USV er skaleringslover viktig. For å opprettholde similaritet mellom en konstruksjon i fullskala og modellskala må tre likheter oppfylles; Geometrisk-, kinematisk- og dynamisk similaritet.

Geometrisk similaritet er et prinsipp som sier at når to forskjellige fysiske systemer har samme geometriske form, kan de sammenlignes ved å endre størrelsen proporsjonalt. Det må derfor være en dimensjonsløs lengdeparameter som beskriver forholdet mellom systemet i fullskala og modellskala. Den er gitt ved

$$\lambda = L_F / L_M, \quad (1)$$

hvor L_M er modellengde og L_F er fullskala lengde. λ (lambda) er en dimensjonsløs skaleringsfaktor [7]. Froude skalering sammenfaller med geometrisk skalering og Froudes tall, Fn uttrykker forholdet mellom treghetskrefter og tyngdekrefter. Fn er gitt ved

$$Fn = U / \sqrt{gL}, \quad (2)$$

hvor U er hastighet, g er tyngdeakselerasjon og L er lengde [8].

Dynamisk similaritet er av stor betydning når gjelder seakeeping-testing. For denne typen similaritet må forholdet mellom kreftene i fullskala være tilsvarende det korresponderende forholdet i modellskala. Eksempel på slike krefter er treghetskrefter og viskøse krefter.

Tabellen under viser skaleringsfaktorer som brukes i dette prosjektet.

Parameter	Enhet	Forhold
Lengde	[m]	λ
Masse	[kg]	λ^3
Volum	[m ³]	λ^3
Treghetsmoment	[kg m ²]	λ^5
Rulleperiode	[s]	$\sqrt{\lambda}$

Tabell 4: Froudes dimensjonsløse skaleringsfaktorer for fysiske parametre [7]

2.2 Bygging av modell

Materialliste:

- **Divinycell H60:** $60\text{kg}/\text{m}^3$
- **Lim:** Cascol Polyurethane
- **Sparkel:** FINIXA Polyester putty
- **Grunning:** SprayMax 1K Shade Fyllprimer 400ml
- **Maling:** Hagmans Signalgul RAL 1003 400 ml

Modellen bygges i en skala på $\lambda = 20$. Se Tabell 4 for skaleringsfaktorer brukt i forbindelse med byggeprosessen. Modellen bygges opp av divinycell (PVC-basert konstruksjonsmateriale) med en tetthet på $60\text{kg}/\text{m}^3$. Materialet leveres i form av større plater (2400 x 1200 x 50mm).



Figur 5: Oppmerking

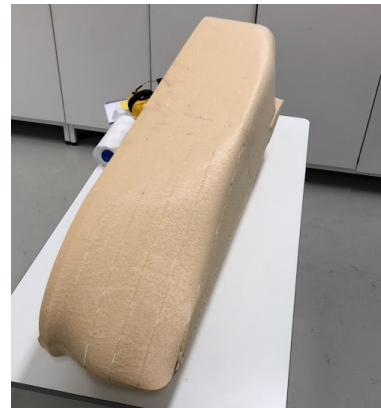


Figur 6: Kapp

Platene måles opp, kappes til og limes sammen. Etter at platene er limt sammen freses modellen ut i to omganger, ettersom fresemaskinen ikke er stor nok til å bearbeide hele skroget samtidig. Denne prosessen utføres av en ansatt ved HVL.



Figur 7: Lim



Figur 8: Ferdig frest

Etter fresingen, sparkles og slipes modellen. Her går en frem ved å sparkle på tynne lag for å oppnå jevn tykkelse. Mellom lagene med sparkel pusses og slipes den. Etterhvert limes de to halve skrogene sammen og sparkling av hele modellen fortsetter for å tette sprekker og skjøter, slik at modellen til slutt har en jevn og fin overflate.



Figur 9: Limes sammen



Figur 10: Ferdig sparklet

Etter at modellen er ferdig sparklet og pusset, grunnes og males den. Fargevalget på malingen er gul som skaper en god kontrast til fargen på reflekskulene, noe som er fordelaktig for kamerasystemet.



Figur 11: Grunning



Figur 12: Ferdig malt

For å gi modellen korrekt tyngdepunkt og massemoment, ballasteres den først i CAD-programvaren «Creo Parametric». Lodder tegnes inn i programvaren og plasseres rundt på modellen. Når loddene er plassert slik at tyngdepunkt og massemoment stemmer i CAD, ballasteres modellen fysisk.



Figur 13: Ballast



Figur 14: Fortøyning og montering av reflekskuler



Figur 15: Montering av luke



Figur 16: Fortøyd i MarinLab

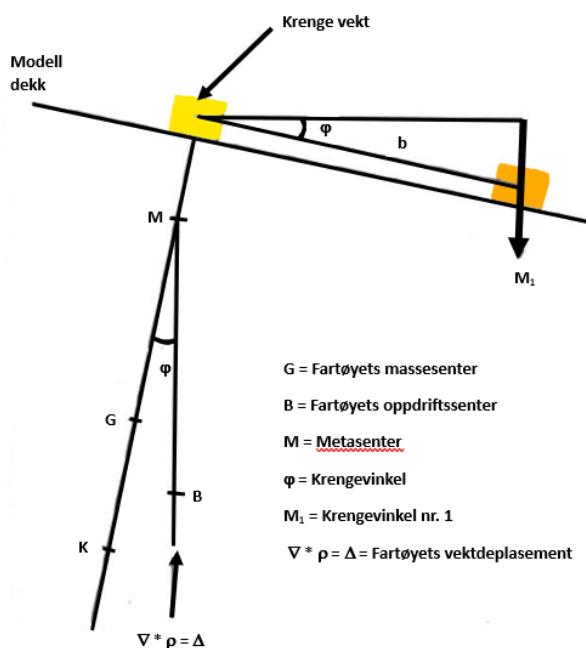
2.3 Ballastering og krengeprøve

Alle flytende konstruksjoner på havet utsettes for ytre og indre krefter som påvirker dens likevekt. Konstruksjonens evne til å motstå disse kreftene og unngå kantring er kjent som statisk stabilitet, som avhenger av en rekke faktorer spesifikke for hver enkelt konstruksjon. De viktigste parametrene som påvirker stabiliteten til en flytende konstruksjon er dens geometriske form, dypgang og lastkondisjon.

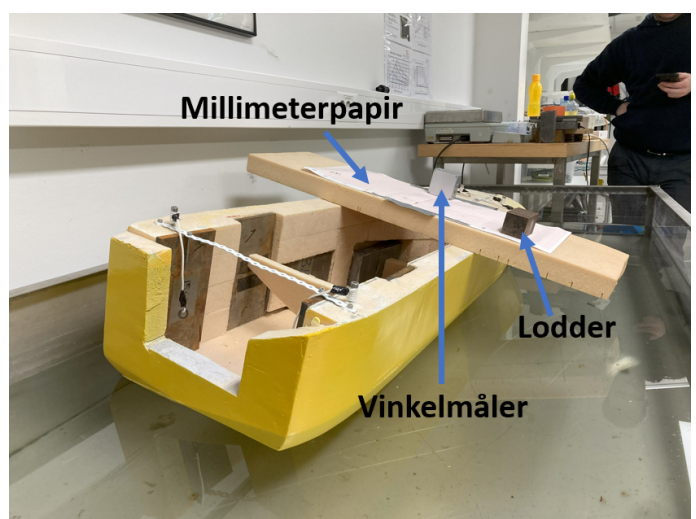
Statisk stabilitet er en viktig faktor å ta hensyn til i skipsdesign og sjøfart. Man finner den statiske stabiliteten til et fartøy ved å se på avstanden mellom tyngdepunktet, G og metasenteret, M . Denne avstanden kalles metasenterhøyde og skrives som \overline{GM} . Metasenteret er punktet hvor oppdriftslinjen ved intaktstabilitet krysser oppdriftslinjen ved krengeing. \overline{GM} er gitt ved følgende formel.

$$\overline{GM} = \overline{KB} + \overline{BM} - \overline{KG}, \quad (3)$$

hvor \overline{KB} er avstanden mellom kjølen, K og oppdriftssenteret, B . \overline{BM} er avstanden mellom oppdriftssenteret og metasenteret, mens \overline{KG} er avstanden mellom kjølen og tyngdepunktet. For å kunne si at fartøyet er statisk stabilt må $\overline{GM} > 0$. Om dette ikke er tilfellet, vil fartøyet før eller siden kandre. Figur 17 nedenfor illustrer hvordan den opprettende armen oppstår ved krengeing, samt hvordan oppdriftslinjene krysses og danner metasenteret, M [9].



Figur 17: Prinsippskisse for krengeprøve [10]



Figur 18: Krengeprøve

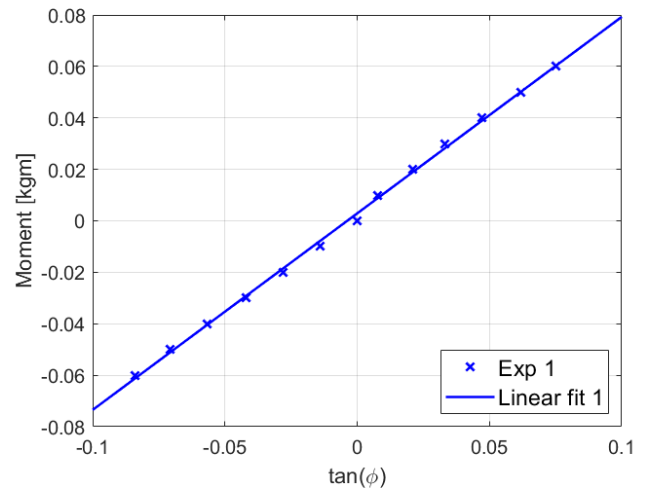
Modellen ballasteres med bly- og stålodd. Loddene limes eller kiles fast for å sikre at dem sitter fast når modellen testes i bølger. Som tidligere nevnt planlegges plassering av ballast på forhånd i CAD. Tegningene i CAD gir kun en indikasjon på hvor tyngdepunktet ligger. Tyngdepunktet må derfor verifiseres ved hjelp av krengeprøver.

Krengeprøver gjennomføres for å evaluere stabiliteten og tyngdepunktet til en flytende konstruksjon. Gjennomføringen gjøres ved å forskyve et bestemt antall lodder med kjent masse en gitt lengde tverrskips. For hver avstand loddene forflyttes, leses krengevinkel av en digital vinkelmåler (Diesella) [11]. Figur 18 viser hvilket utstyr som brukes under krengeprøven. For å oppnå nøyaktige målinger forskyves loddene på millimeterpapir.

Prosedyren gjentas med korrigeringer av ballast helt til \overline{GM} stemmer. Figur 19 viser krenagemoment som funksjon av krengevinkel. \overline{GM} er stigningstallet til kurven. \overline{KG} kan løses ved hjelp av formel 3 når \overline{GM} er bestemt.

Arm [m]	ϕ [deg]
-0.06	-4.8
-0.05	-4.05
-0.04	-3.25
-0.03	-2.4
-0.02	-1.6
-0.01	-0.8
0	0
0.01	0.45
0.02	1.2
0.03	1.9
0.04	2.7
0.05	3.55
0.06	4.3

Tabell 5: Data fra endelig krengeprøve

Figur 19: $GM = 0.027m$, $KG = 0.146m$

Riktig massemoment er også avgjørende for båtens stabilitetsegenskaper. Massemomentet forteller hvordan massene er fordelt rundt aksene. En kan regne om massemoment til gyrasjonsradius, som er avstanden fra rotasjonscenter til det punktet der all massen konsentreres for å oppnå samme treghetsmoment som det opprinnelige objektet. Gyrasjonsradiusen, R er gitt ved

$$R = \sqrt{I/m}, \quad (4)$$

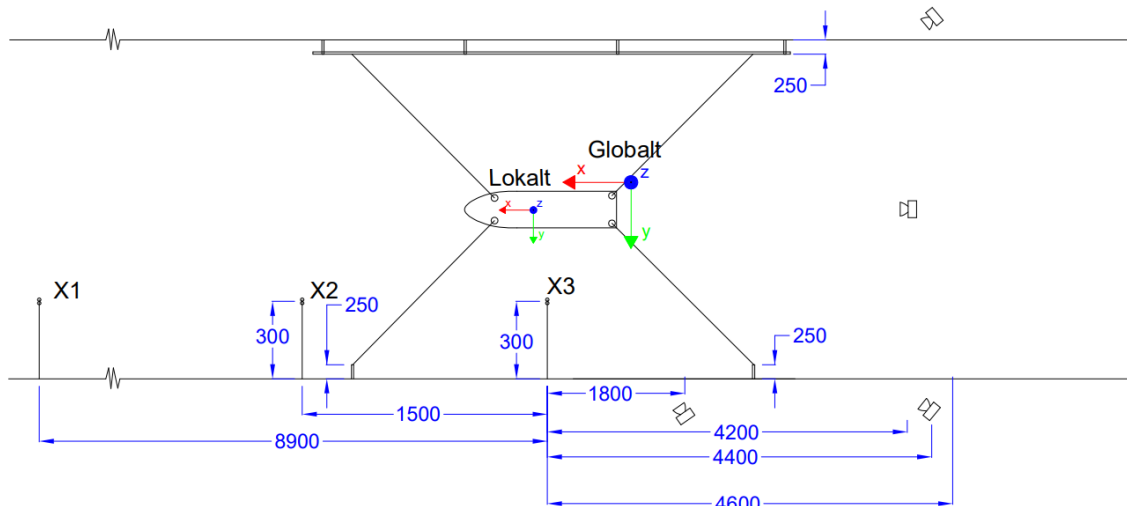
hvor I er massemoment og m er masse [12]. I dette forsøket verifiseres gyrasjonsradiusen ved hjelp av «Creo Parametric». Tabell 3 viser at R44 og R55 i modellskala skal være 0.1315m og 0.28m. Figur 20 nedenfor viser at dette stemmer.

```
RADII OF GYRATION with respect to PRINCIPAL AXES:
R1 R2 R3 1.3168059e-01 2.8324245e-01 3.0354662e-01 M
```

Figur 20: Gyrasjonsradius i «Creo Parametric»

2.4 Testoppsett

Testene gjennomføres i slepetanken på MarinLab [4] (50 x 3 x 2.2m). Det er montert 3 bølgehøydemålere (X1, X2 og X3) i slepetanken som logger bølgehøydedata ved forskjellige avstander fra flotasjonscenteret til modellen. De plasseres strategisk, med den første 9m foran modellen, den andre 1.5m foran modellen og den tredje i modellens flotasjonscenter. Hver bølgehøydemåler kalibreres individuelt ved å senke og løfte den i tanken, med nøyaktige instruksjoner på hvordan dette gjøres i bølgeprogramvaren «Wave Control» [13].



Figur 21: Testoppsett (Avstander med utgangspunkt i flotasjonscenter til modellen)

Utstysliste:

- **Bølgehøydemålere:** Edinburgh Designs (128 Hz)
- **Qualisys Motion Capture System:** Oqus 5-series - 180 Hz [14]
- **Reflekskuler**
- **Fjærer:** Miks fra Biltema og Clas Ohlson
- **Forankringstau:** Polyestersilkeline fra Biltema
- **Aluflex:** 30 x 30mm
- **Bølgegenerator:** Edinburgh Designs
- **Njord Wave Synthesis:** Edinburgh Designs, programvare for design av bølger
- **Wave control:** Edinburgh Design, programvaren som kjører bølger

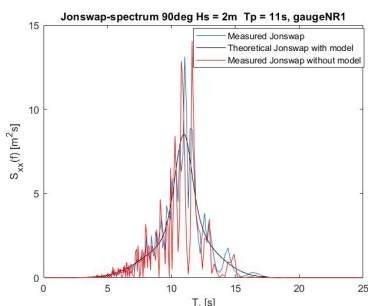
Før modellen kan testes i de ulike sjøtilstandene kalibreres bølgespektrene. Bølgene designes i programvaren «Njord Wave Synthesis» [15]. Her spesifiseres type bølgespekter, signifikant bølgehøyde, H_s og bølgeperiode, T_p , samt spredningsparameteren γ .

Hver sjøtilstand kjøres først i 45 minutt uten modell i tanken. Bølgehøydemålerne logger bølgedataen. Etter kjøring sammenlignes logget data med teoretisk bølgespekter. Dersom spektralenergien fra loggført data er lav sammenlignet med teoretisk spekter, utføres en forsterkningskorrigering og ny kjøring gjennomføres og logges. Denne prosessen gjentas helt til verdiene er akseptable sett opp mot teoretiske spekterverdier. Tabell 6 nedenfor viser hvor mange forsterkningskorrigeringer det er utført for de enkelte sjøtilstandene.

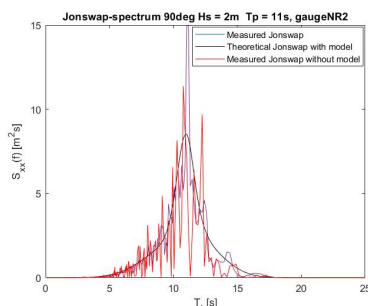
Sjøtilstand	Antall
Hs = 2m , Tp = 7s	3
Hs = 2m , Tp = 9s	2
Hs = 2m , Tp = 11s	2
Hs = 3.5m , Tp = 7s	2
Hs = 3.5m , Tp = 9s	2
Hs = 3.5m , Tp = 11s	2

Tabell 6: Antall forsterkningskorrigeringer

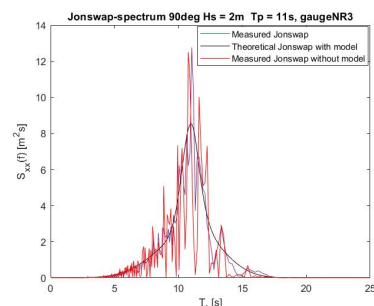
Figurene under viser 3 JONSWAP-bølgespektrere som teoretisk er like, men målt med ulike bølgehøydemålere. Alle har en god tilnærming til den teoretiske kurven.



Figur 22: Bølgehøydemåler nr. 1



Figur 23: Bølgehøydemåler nr. 2



Figur 24: Bølgehøydemåler nr. 3

For å evaluere nøyaktigheten til bølgespektrene brukes RMSE-metoden (Root Mean Square Error). RMSE betegnes som kvadratrotten av den gjennomsnittlige kvadratfeilen og måler gjennomsnittlig avvik mellom de faktiske verdiene og de forventede teoretiske verdiene [16]. Det er med andre ord ønskelig å oppnå lavest mulig RMSE-verdi. Tabell 7 nedenfor viser RMSE-verdiene for bølgehøydemålerne som er brukt i forsøkene.

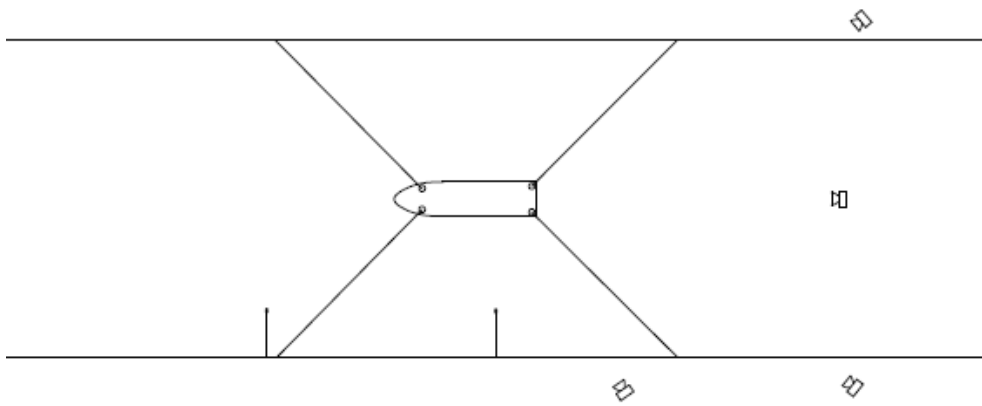
Bølgehøydemåler	RMSE %
1	3.5872
2	3.5872
3	3.5873

Tabell 7: RMSE-verdier

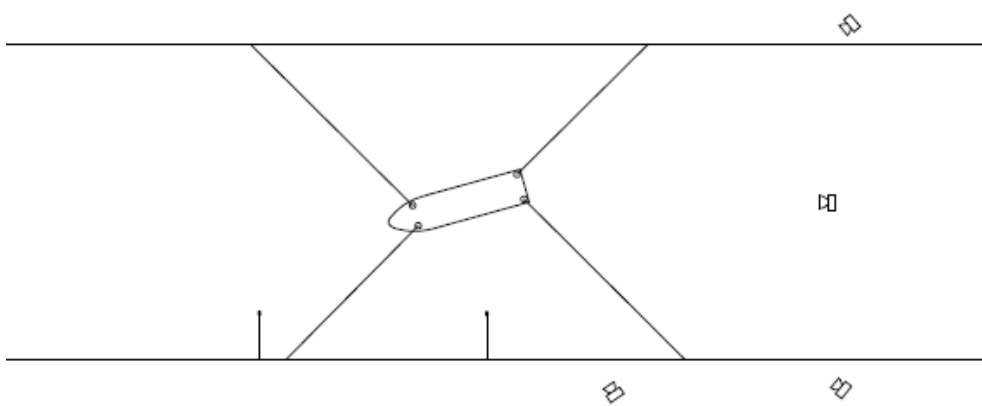
Resultatene baserer seg på målinger fra bølgehøydemåler 3 (X3) da denne er plassert på linje med modellens flotasjons-senter. RMSE-verdien for denne bølgehøydemåleren er noe høyere enn de to andre, men likevel så liten at det ikke vil bety noe for resultatene. Se Figur 21 for plassering av bølgehøydemålerne.

2.4.1 Fortøyningsoppsett

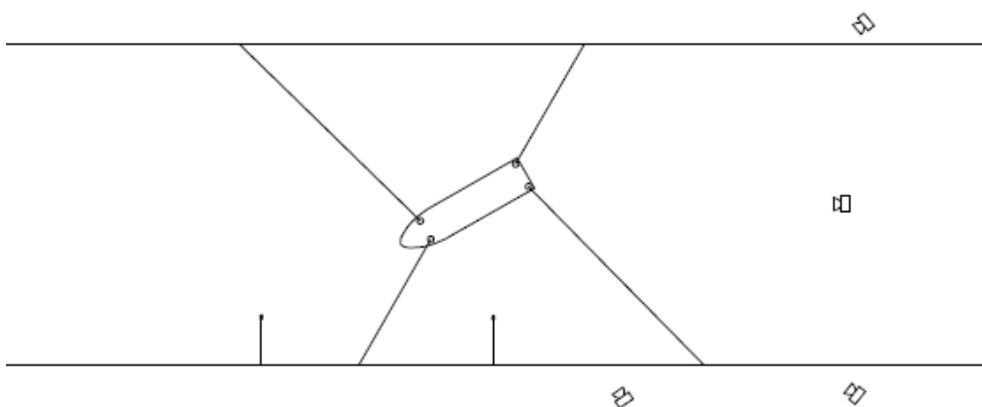
Figurene under viser skisser av fortøyningsoppsettene som brukes i prosjektet. For at fortøyningssystemet skal påvirke resultatene minst og likest mulig for alle kjøringene, forsøkes linene å fortøyres 45° relativt til tanken. Dette fordi bølgene kommer fra samme sted og de dekomponerte kreftene vil da være tilsvarende like for linene.



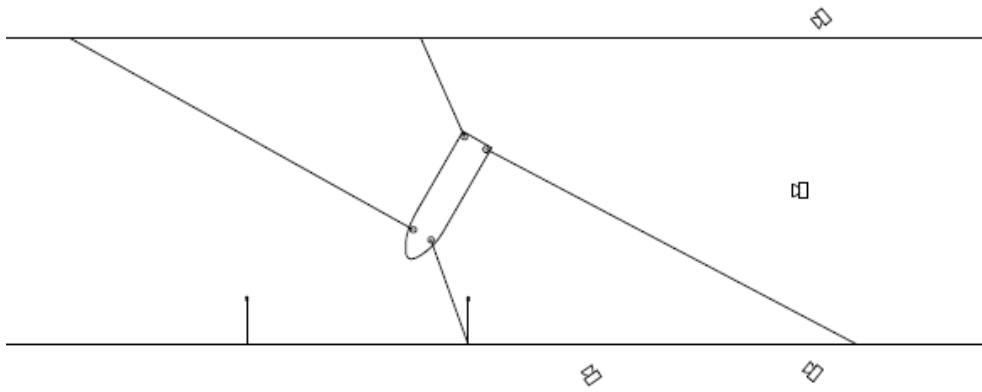
Figur 25: 0°



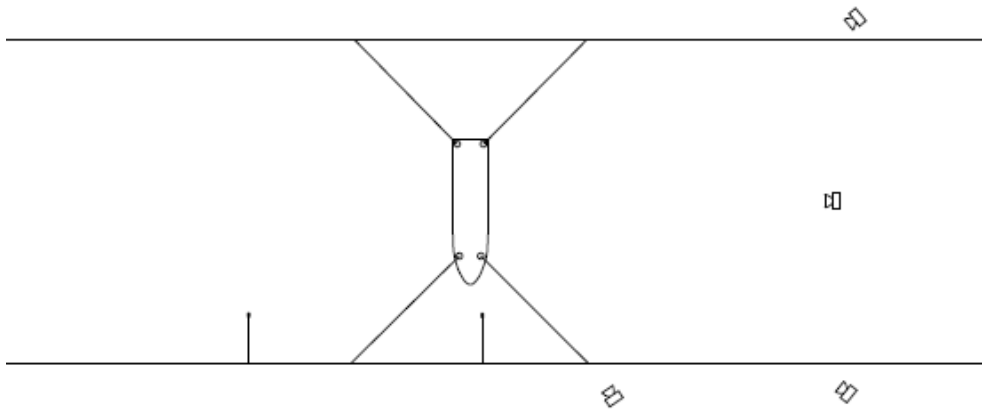
Figur 26: 15°



Figur 27: 30°



Figur 28: 60°



Figur 29: 90°

På forhånd av decay-testene identifiseres fjærenes og fortløyningsystemets egenperioder, for å bekrefte at de ligger unna bølgeperiodene.

Først testes kun de sammensatte fjærene. Fjærene henges på et stativ og et kjent antall lodder med en gitt vekt henges på fjærene. Kraft og forlengelse av fjærene leses av og fjærkonstanten regnes ut ved hjelp av følgende formel.

$$k = F/x, \quad (5)$$

hvor k er fjærstivhet, F er kraft og x fjærforlengelse. Deretter kan egenfrekvensen f_0 beregnes etter følgende formler.

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{\Delta}}, \quad (6)$$

hvor $\omega_0 = 2\pi f_0$. f_0 er egenfrekvensen og Δ er modellens massedeplassment.

k beregnes til å være $34.18 N/m$. Ved hjelp av formel 6 beregnes fjærenes egenperiode til å være 25s, som ligger utenfor frekvensområdet til bølgene.

Når fjærene er testet og montert, fortløynes modellen i slepetanken. For hver av vinklene båten fortløynes i utføres en test for å undersøke fortløyningsystemets egenperioder. Dette gjøres ved hjelp av et tau og en lastcelle (DBBSM-5kg-003-000) [17]. Tauet festes i modellen og trekkes med konstant kraft en bestemt avstand i bølgeretning. Kraft og avstand fra likevektsposisjon leses av og systemets egenperiode beregnes på samme måte som fjærene alene. Se formel 5 og 6.

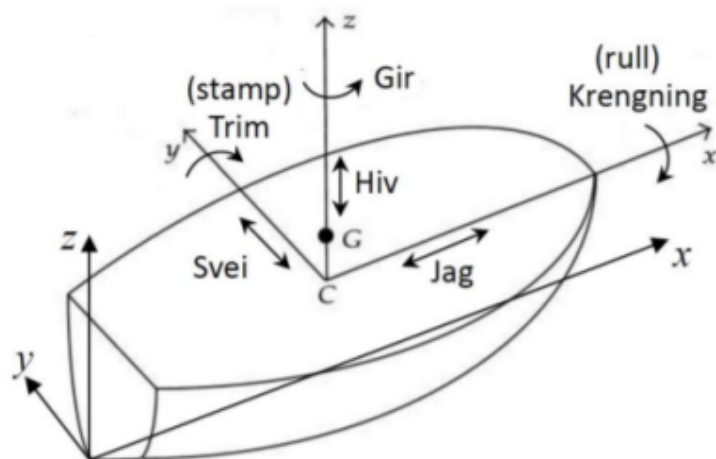
Tabell 8 nedenfor viser fortløyningsystemenes egenperioder. De ligger alle utenfor bølgeperiodene typisk for Nordsjøen.

Bølgeretning	T_0
0°	15.97s
15°	16.53s
30°	20.07s
60°	20.97s
90°	21.35s

Tabell 8: Egenperiodene til fortøyningssystemene ved eksitasjon i bølgeretning

2.4.2 Decay-tester

Alle marine konstruksjoner er utsatt for dynamiske laster. Dette resulterer i dynamisk respons (bevegelse). Bevegelsene til flytende konstruksjoner deles inn i 6 frihetsgrader. Frihetsgradene refereres ofte til som 6DOF, som står for «Six Degrees of Freedom».



Figur 30: De 6 frihetsgradene [18]

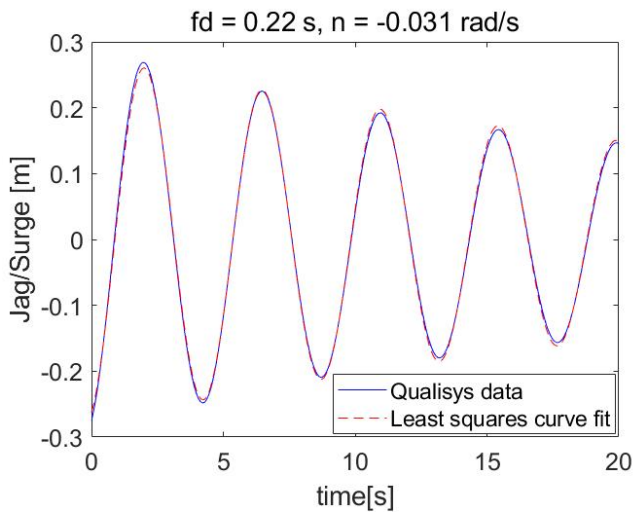
Decay-tester gjennomføres før seakeeping-testen starter for å identifisere egenperioder i de ulike frihetsgradene fra fortøyningssystemet. Testen gjennomføres ved å påføre en kraft i retning av frihetsgraden som skal testes, slik at modellen går ut av likevektsposisjon og deretter naturlig dempes. Bevegelsen logges av kamerasystemet «Qualisys Motion Capture System» (Oqus 5-series - 180 Hz) som er installert over slepetanken i MarinLab [14].

Qualisys kamerasystemet som brukes i MarinLab er høyhastighetskameraer som bruker 3D-bevegelsesregistrering for å spore bevegelsene i sanntid. Kameraene plasseres strategisk i forhold til modellens posisjon. Med flere kameraer som er koblet sammen økes synsfeltet og oppløsningen. De bruker infrarød teknologi for å spore refleksskulene som plasseres på modellen. Kameraene logger bevegelsene med en frekvens på 180Hz. Se Figur 21 for plassering av kameraene.

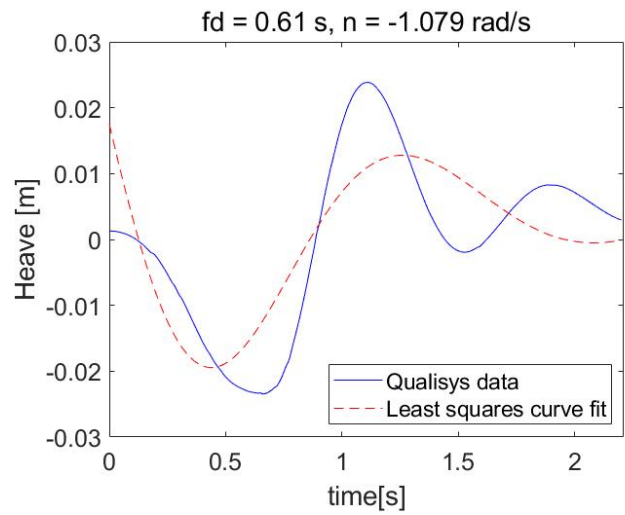
Kalibrering av kamerasystemet utføres av veileder på forhånd av decay-testene.

For behandling av decay-dataen brukes programmeringsprogramvaren Matlab. Her kuttes dataintervallene slik at kun de første svingningene evalueres og kurvetilnærmes. Til dette brukes et kurvetilnæringsverktøy (Least squares curve fit) i Matlab for å evaluere dempingen og frekvensen [19].

Modellen er nokså stiv i hiv- og stamp-retning, noe som gjør at den ikke dempes slik som de andre frihetsgradene. Kurvetilnæringsverktøyet virker ikke like bra i disse tilfellene og egenperiodene må derfor evalueres manuelt. Dette gjøres ved å måle avstanden mellom to bølgetopper. Som vist på decay-kurven for hiv, fungerer kurvetilpasning dårlig og en manuell evaluering av egenperiodene utføres. Når det gjelder decay-kurven for jag derimot, er kurvetilnæringsingen akseptabel.



Figur 31: Decay-test jag



Figur 32: Decay-test hiv

Dette utføres for alle frihetsgrader i alle bølgeretninger. Tabell 9 nedenfor gir en oversikt over alle egenperiodene fra fortøyningsystemet i fullskala.

	0°	15°	30°	60°	90°
jag	20.145s	17.817s	24.845s	27.951s	24.438s
svai	29.422s	24.708s	25.41s	20.328s	21.296s
hiv	3.803s*	5.454s*	3.532s*	3.363s*	3.488s*
gir	11.646s	9.298s	10.4s	10.164s	10.802s
stamp	6.389s*	3.532s*	3.042s*	3.264s*	3.443s*
rull	5.375s	4.98s	4.472s	4.758s	5.053s

Tabell 9: Egenperioder fra decay-tester. Tallverdier markert med * er usikre målinger.

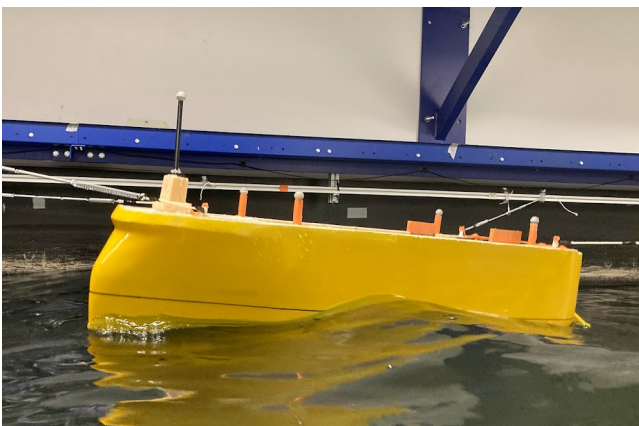
2.4.3 Seakeeping-test

Når egenperiodene er identifisert settes seakeeping-testene i gang. Tabell 1 viser hvilke sjøtilstander modellen testes i. Fullskala testtid på 3 timer tilsvarer testtid på 40 minutter nedskalert, men det er i dette prosjektet lagt inn testtid på 45 minutter for å ha rikelig med data slik at start og slutt av målingene kan kuttes bort. Skaleringen beregnes ved følgende formel.

$$T_m = T_f / \sqrt{\lambda}, \quad (7)$$

hvor T_m er nedskalert testtid, T_f er fullskala testtid og λ er skaleringsfaktor.

Modellen testes for bølger med retning: 0°, 15°, 30°, 60° og 90°.



Figur 33: 0° innkommende bølgeretning



Figur 34: 60° innkommende bølgeretning

For å visualisere responsen til modellen fremstilles bevegelsesdataen fra testene i «Response Amplitude Operator»-grafer (RAO), som er et mål på hvordan en flytende struktur, som et skip eller en offshore plattform, responderer i en sjøtilstand. RAO beregnes vanligvis for et bestemt frekvensområde og for en bestemt bølgeretning. Dette brukes i designet og analysen av flytende strukturer for å forutsi deres respons på bølger og for å bestemme dens nødvendige strukturelle styrke og stivhet. RAO defineres som forholdet mellom systemresponsen, S_{yy} og bølgeamplituden, S_{xx} . S_{yy} er gitt ved

$$S_{yy} = \left(\int_{-\infty}^{\infty} R_{yy}(\tau) e^{i\omega\tau} d\tau \right), \quad (8)$$

S_{xx} er gitt ved

$$S_{xx} = \left(\int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(\tau) e^{i\omega\tau} d\tau \right), \quad (9)$$

RAO kan da defineres som

$$RAO = \sqrt{S_{yy}/S_{xx}}. \quad (10)$$

R_{yy} og R_{xx} er dataen fra målingene i tidsplanet [20].

Til postprosessering brukes pwelch funksjonen i Matlab. Denne funksjonen brukes til å beregne «Fast Fourier Transform» (FFT) for hvert segment og setter det så sammen til «power spectral density estimat» (PSD) ved hjelp av welch's metode. Welch's metode er en vanlig metode som brukes til å anslå spektraltettheten i en tidsrekke. Denne teknikken innebærer å dele opp signalet i overlappende segmenter og anvende Fourier-transformasjon på hvert segment. Deretter beregnes gjennomsnittet av kvadratet av Fourier-transformasjonene fra de overlappende segmentene. Windowing, som inngår i pwelch-funksjonen brukes for å justere hvor detaljert kurve en ønsker (spektraloppløsning) [21]. Både S_{yy} og S_{xx} løses med denne metoden.

2.5 Feilkilder

I dette delkapittelet nevnes potensielle feilkilder som kan ha påvirket resultatene.

Under byggingen av modellen gjøres det forenklinger ved at akslinger, propeller og gjennomføringer i skott ikke tas i betraktning. Disse forenklingene er nødvendige for å kunne gjenskape modellen.

Ettersom modellen bygges fra hånd kan unøyaktigheter på overflaten oppstå. Dersom tykkelsen på sparkelet ikke er lik tvers over modellen, kan dette fører til små asymmetrier som igjen kan påvirke resultatene.

Det er ikke utført noe fysisk test for å verifisere massemomentet til modellen. Den er kun beregnet teoretisk i «Creo Parametric». Dersom dette ikke stemmer, vil resultatene påvirkes.

Til krengeprøve brukes det lodd og en elektronisk vinkelmåler fra Diesella. Som alt annet elektronisk utstyr er det også knyttet usikkerhet til dette apparatet. Nøyaktigheten her er på $\pm 0,2^\circ$ [11].

Lastcellen som brukes i forbindelse med test av fortøyningssystemet har en nøyaktighet på $< 0.03\%$ [17].

Det er også knyttet usikkerhet til fortøyningssystemet som holder modellen i posisjon. Frekvensområdene til bølgene og fortøyningene er teoretisk ulike, men høyere ordens frekvenser til fortøyningene kan befinne seg i samme frekvensområde som bølgene. Skulle dette oppstå vil modellresponsen forsterkes og gi urealistiske resultater. Utmatting av av fjærene i linene kan også oppstå under testing og fjærkonstanten vil endres om dette oppstår. Dette kan gi utslag i resultatene når dataen prosesseres.

Korrekt montering og plassering av reflekskulene som kamerasystemet bruker til måling av bevegelsene er viktig. Om kulene monteres løse kan det skape et totalbilde av bevegelsen som ikke samsvarer med virkeligheten. Qualisys kamerasystemet har en nøyaktighet på $\pm 5\text{mm}$ per markør.

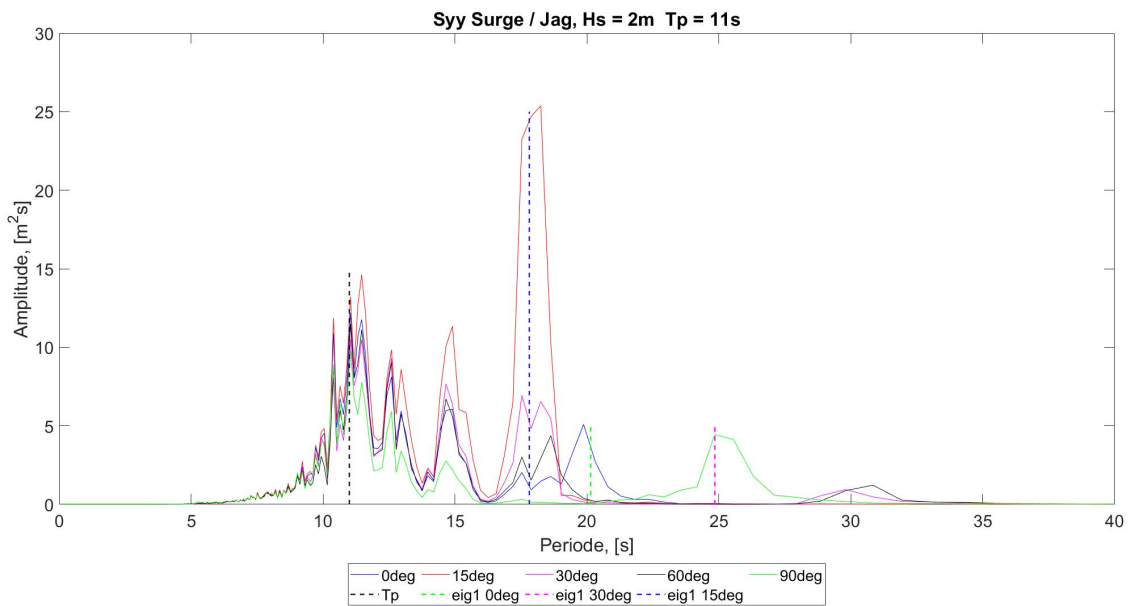
Bevegelsene til modellen og modellens plassering i tanken gjør at det vil oppstå refleksjoner i tankveggen, særlig i de tilfellene båten er fortøyd 30° og 60° relativt til innkommende bølger. Refleksjonene kan bidra til forsterket respons.

3 Resultat

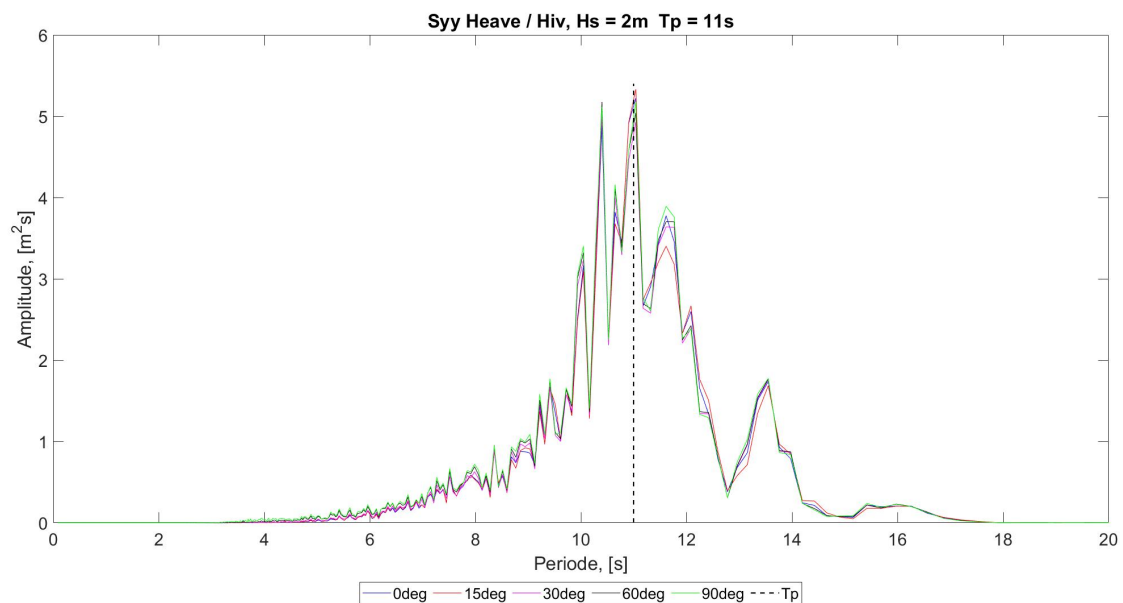
I følgende seksjon presenteres resultater fra seakeeping-testene. Innledende vises to eksempler på systemrespons-grafer fra seakeeping-testene. Videre presenteres et utvalg RAO-grafer. Resterende Syy-grafer og RAO-grafer ligger vedlagt. Avslutningsvis sammenlignes SINTEF-resultatene med de eksperimentelle resultatene fra dette prosjektet.

3.1 Systemrespons

Figurene under viser to av responspekterne fra seakeeping-testene. Disse viser systemresponsen for jag og hiv i sjøtilstanden $H_s = 2\text{m}$, $T_p = 11\text{s}$. De vertikale stiplede linjene viser fortøyningssystemets egenperioder. Bølgeperioden T_p er også markert. Se Tabell 9 for oversikt over resterende egenperioder fra fortøyningssystemet.



Figur 35: Syy jag



Figur 36: Syy hiv

3.2 Respons USV

I dette delkapittelet vil responsen til USV'en presenteres grafisk. De presenteres som RAO-grafer som forklart i kapittel 2.4. Flere av grafene inneholder numerisk støy de første sekundene, noe som må sees bort fra. Dette gjelder spesielt for frihetsgradene hiv og stamp. Det er også verdt å merke seg at de store toppene på kurvene skyldes fortøyningssystemet, noe som ikke vil være reelt i virkeligheten for operasjoner med ROV i Nordsjøen. De vertikale stiplede linjene markerer noen av systemenes egenperioder. De resterende er vist i Tabell 9.

For å få vist frihetsgradene hiv, stamp og rull tydelig, presenteres to separate grafer for hver av dem. Disse frihetsgradene har områder som kan være visuelt vanskelig å skille fra hverandre.

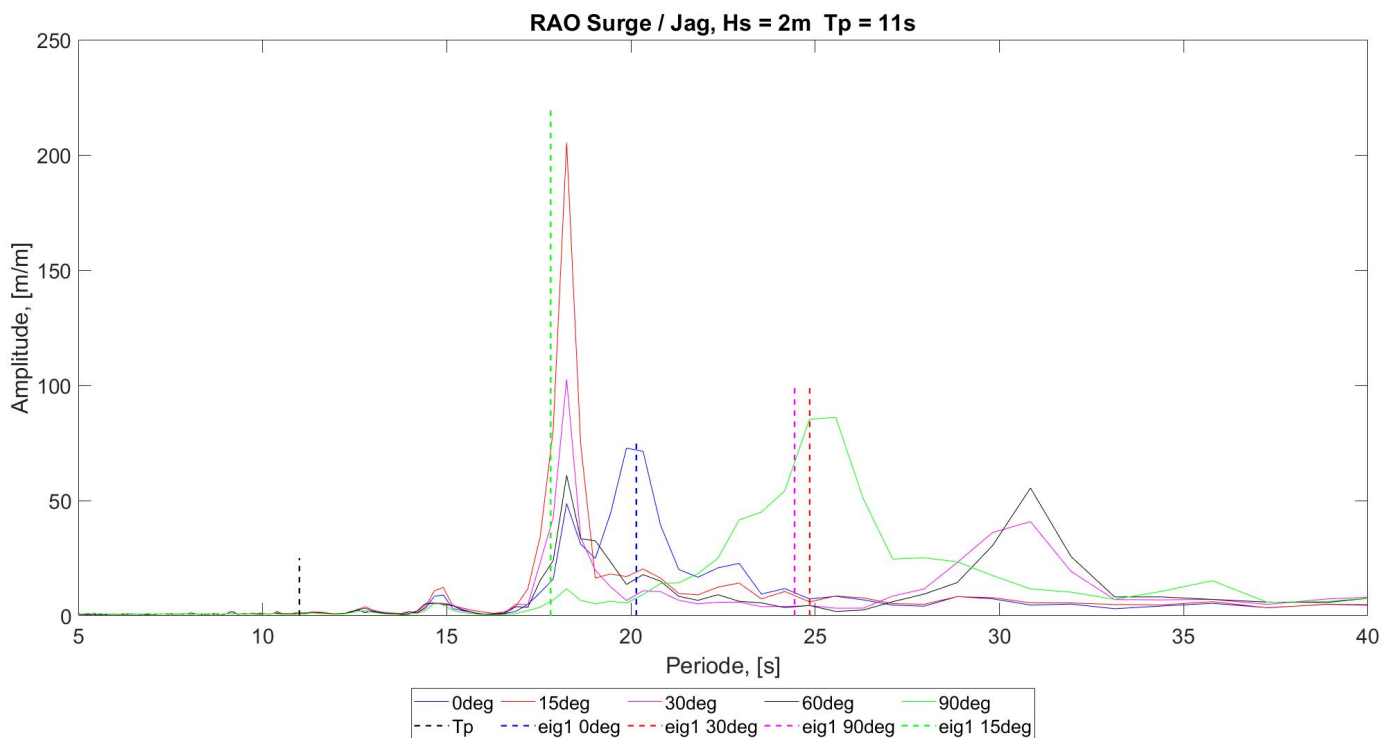
3.2.1 Jag, svai og gir

Grafene under viser responsen i jag, svai og gir. Responsen i jag og svai er generelt lav og jevn i periodene som er typisk for Nordsjøen ($T_p = 7\text{s}-11\text{s}$). Dette gjelder for alle sjøtilstander som er testet i dette prosjektet. Det er heller ingen forventede egenperioder innenfor dette intervallet.

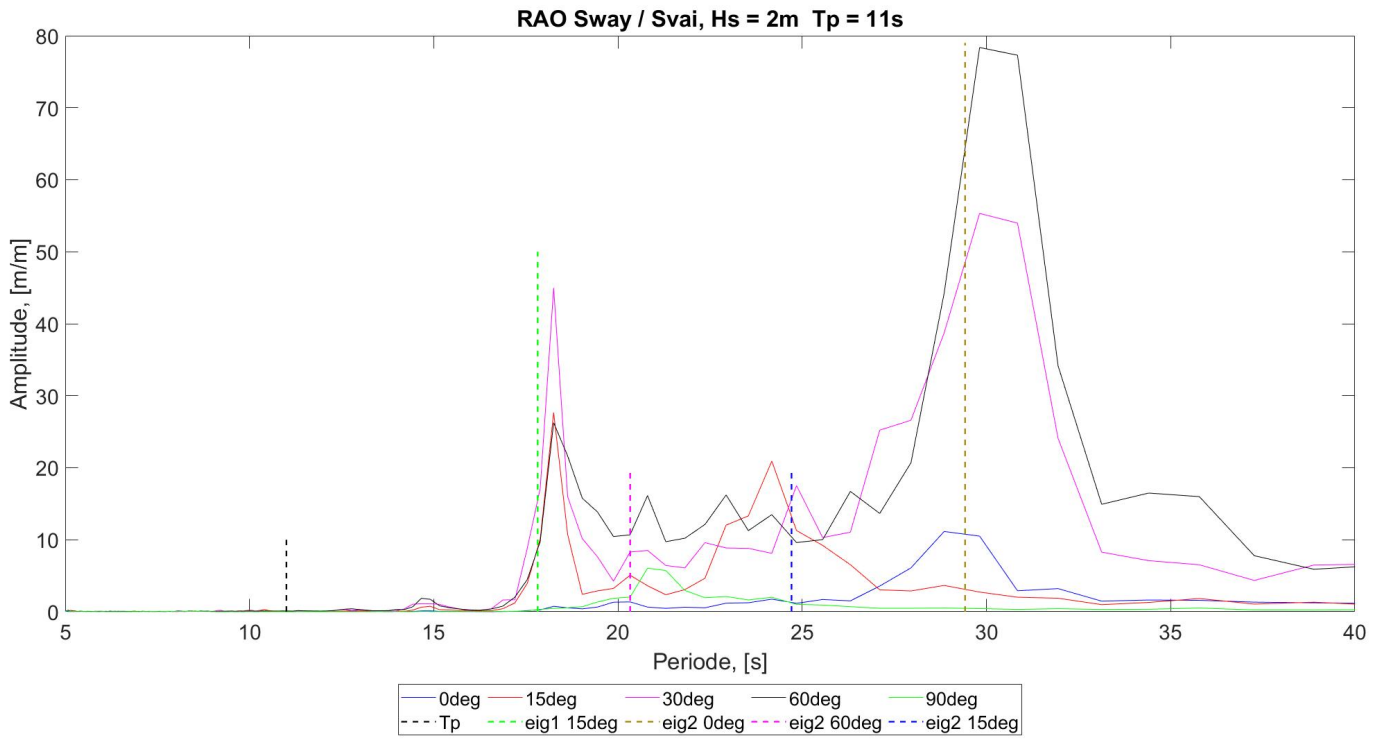
Egenperioden i jag ved 15° vises igjen i både svai og gir, men dominerer i RAO-grafen for jag. På samme måte vises egenperioden for svai ved 0° i alle de tre grafene. Her dominerer den i RAO-grafen for svai.

Responsverdiene i gir er størst for bølgene med retning på 30° og 60° . For 0° og 90° er responsverdiene svært lave. Responsverdien for bølger med en bølgeretning på 15° ligger mellom disse to. For de to sjøtilstandene med T_p lik 11 sekunder oppstår det en kunstig høy forsterkning grunnet egenperioder fra fortøyningssystemet. Dette er en uønsket effekt som burde vært unngått. Til tross for dette kan man se at sjøtilstanden følger de samme trendene som resten av sjøtilstandene når det gjelder forskjellen i responsverdiene mellom bølgeretningene.

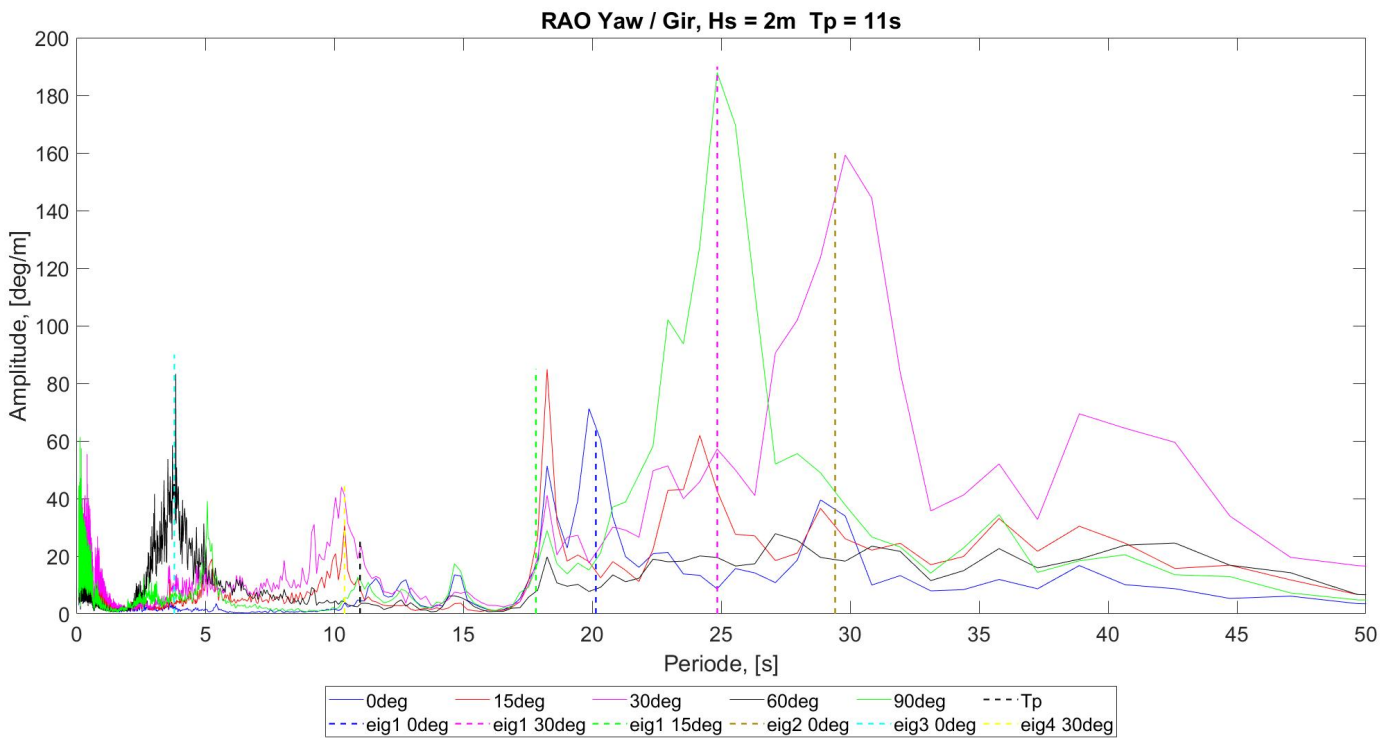
På RAO-grafen for gir kan man også se egenperioder fra andre frihetsgrader dukke opp. Både egenperioden for jag og svai som kommentert i avsnittet over er å se her. I tillegg er det en topp rundt periode på 4 sekunder, hvor egenperioden til hiv befinner seg.



Figur 37: RAO jag



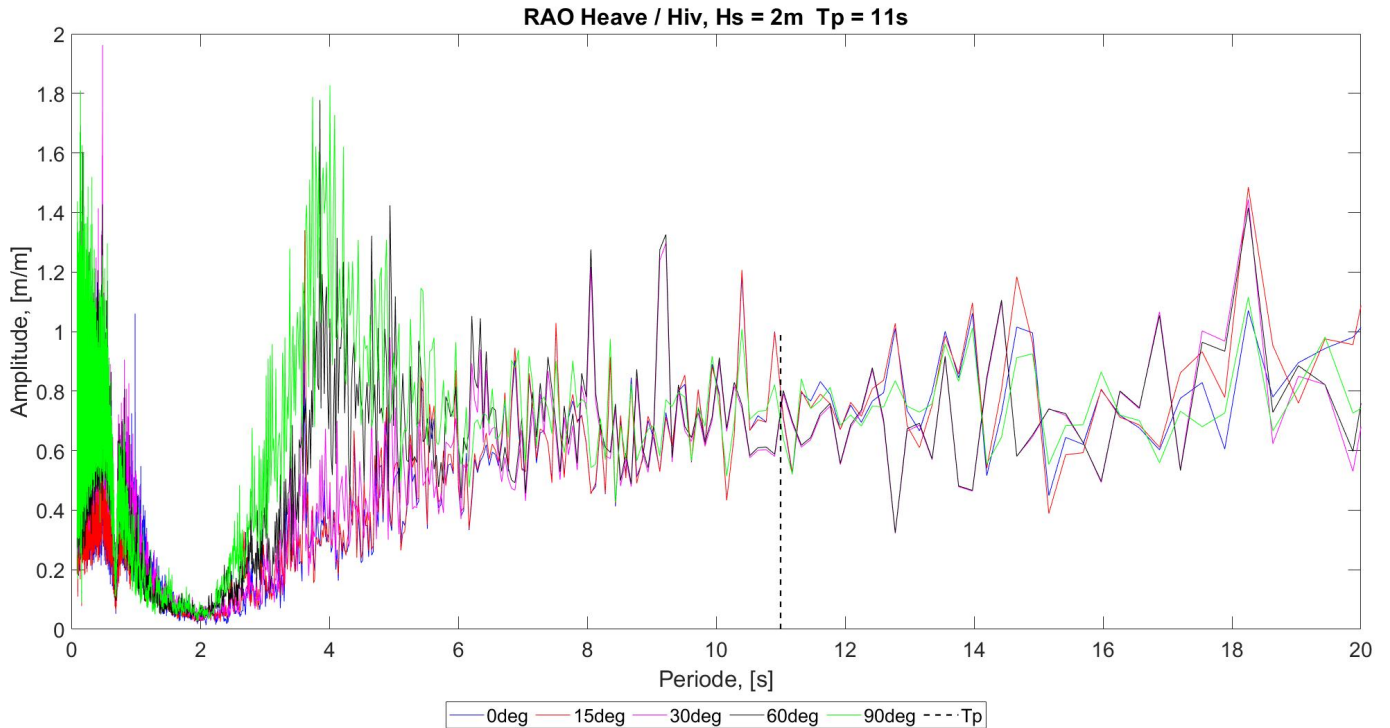
Figur 38: RAO svai



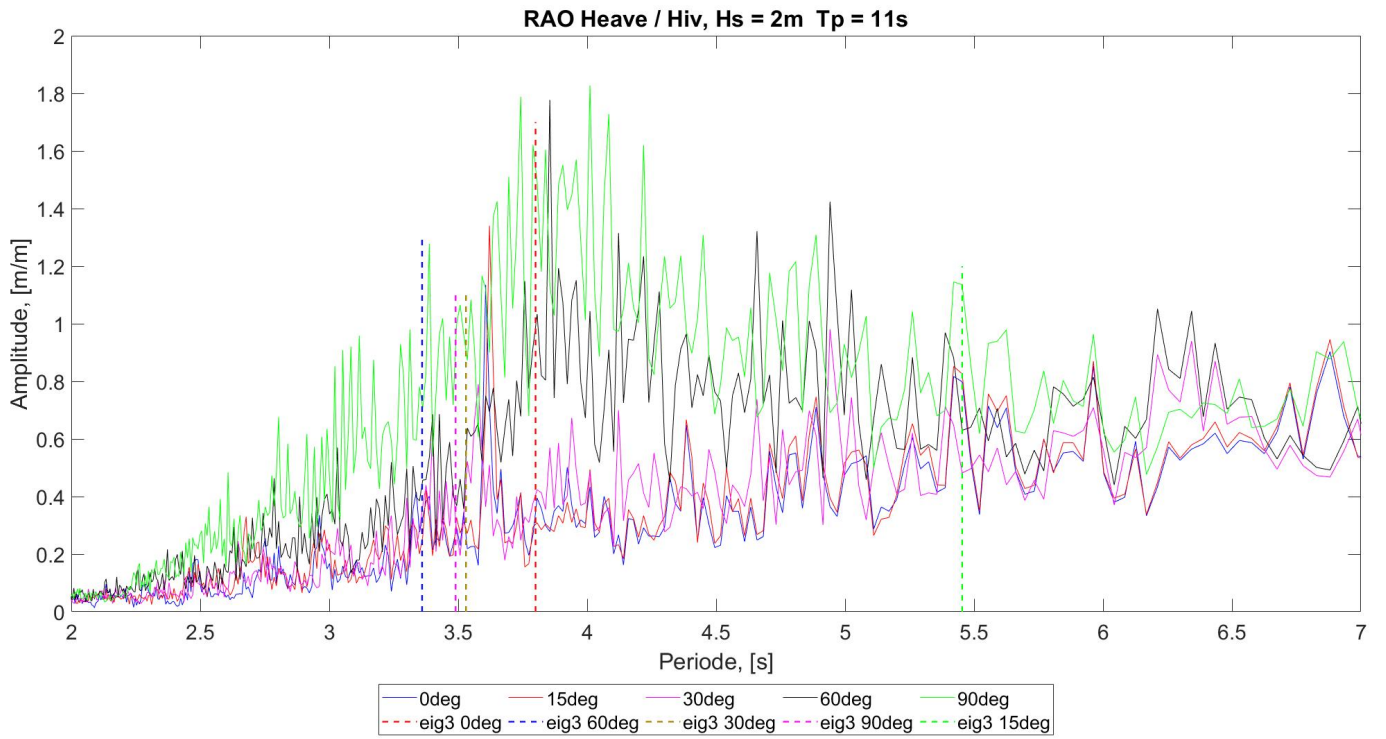
Figur 39: RAO gir

3.2.2 Hiv

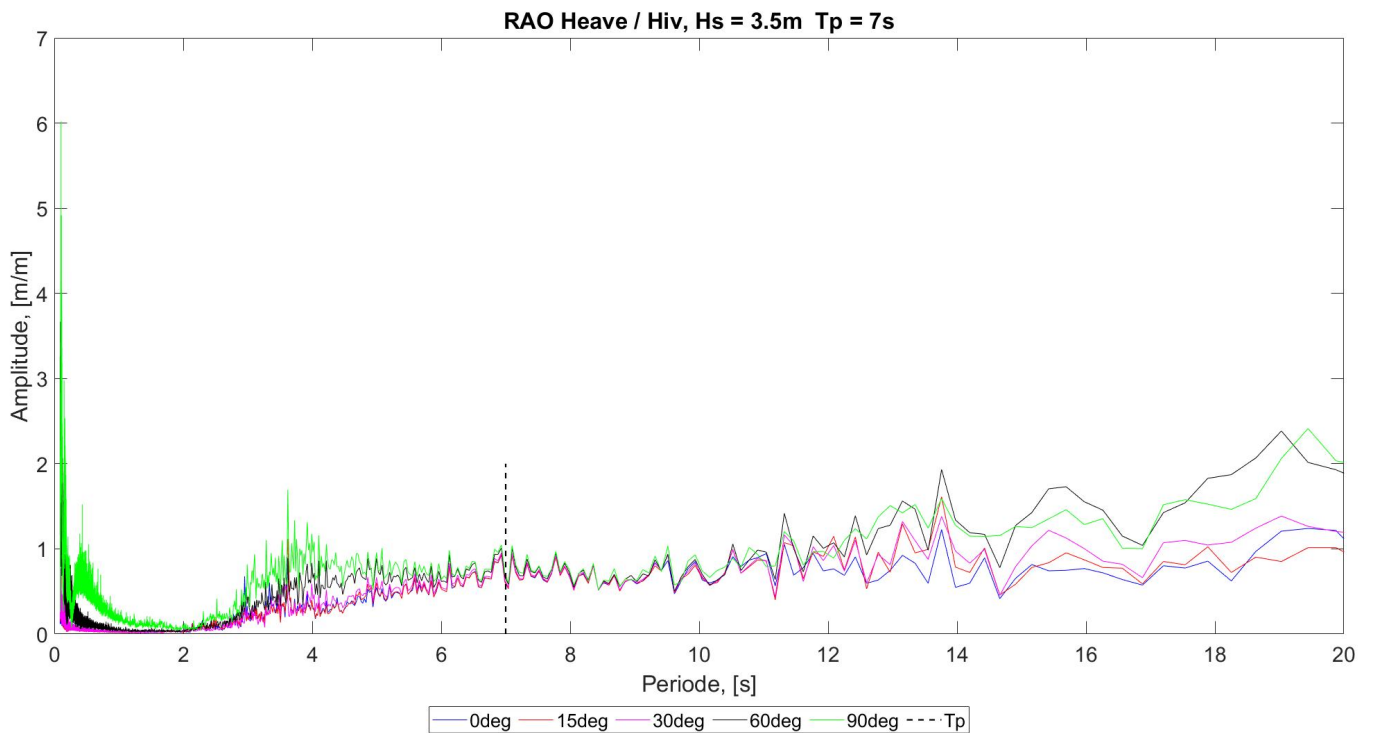
Figurene under viser responsen i hiv for to av sjøtilstandene. Det er lite variasjon mellom responsen for de ulike bølgeretningene i periodene typisk for Nordsjøen ($T_p = 7\text{s}-11\text{s}$). Dette gjelder for alle sjøtilstandene som er testet. I dette området går responsverdien i begge tilfeller mot 1m/m , noe som betyr at USV'en i denne frihetsgraden beveger seg med samme frekvens som bølgene beveger seg. Toppene ved periode på 4 sekunder skyldes egenperioder i hiv og stamp fra fortøyningsystemet.



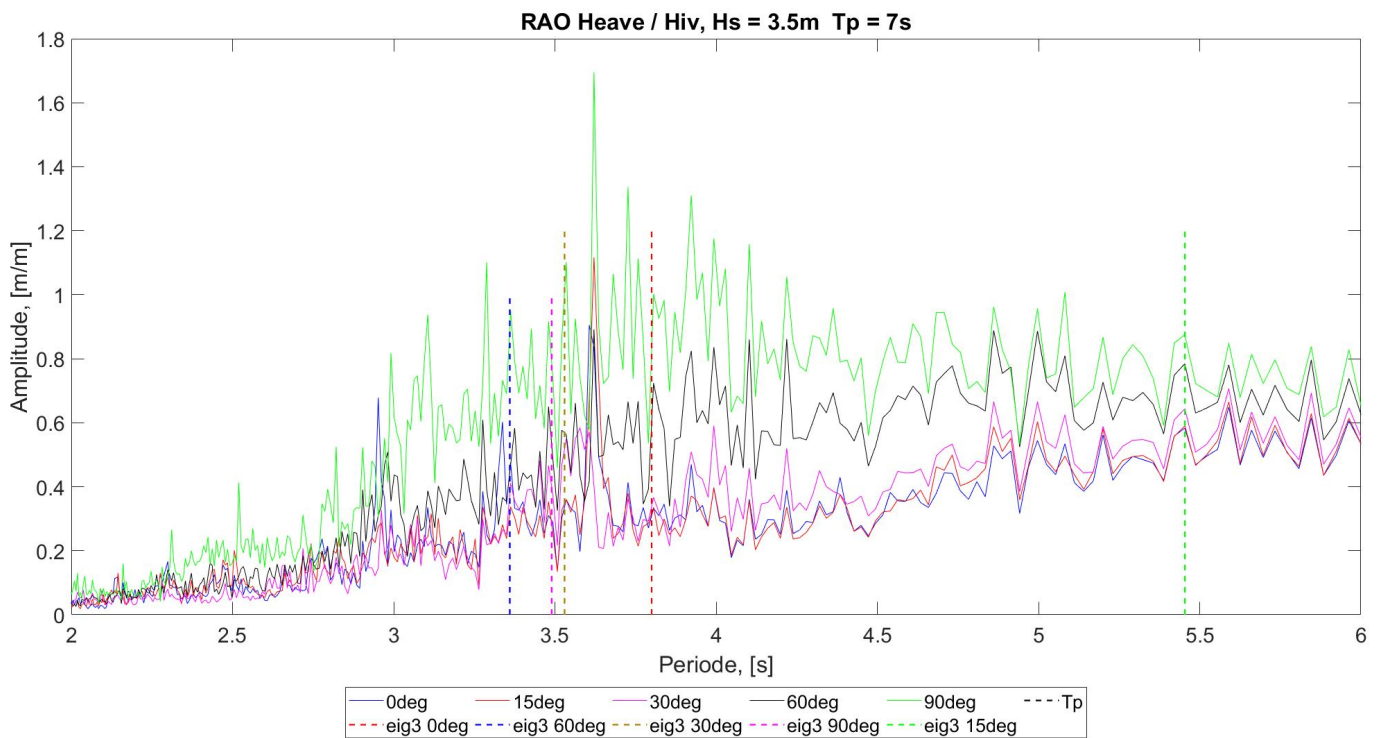
Figur 40: RAO hiv



Figur 41: RAO hiv (forstørrelse)



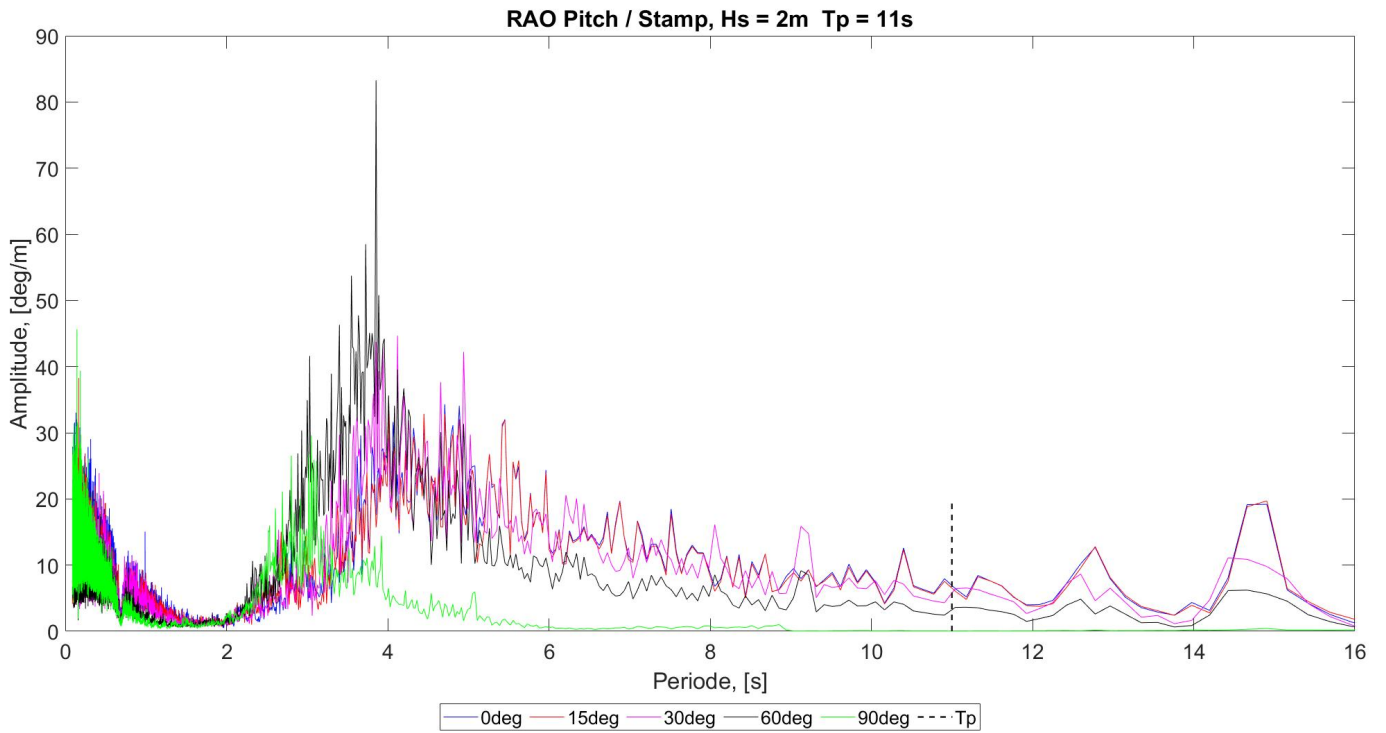
Figur 42: RAO hiv



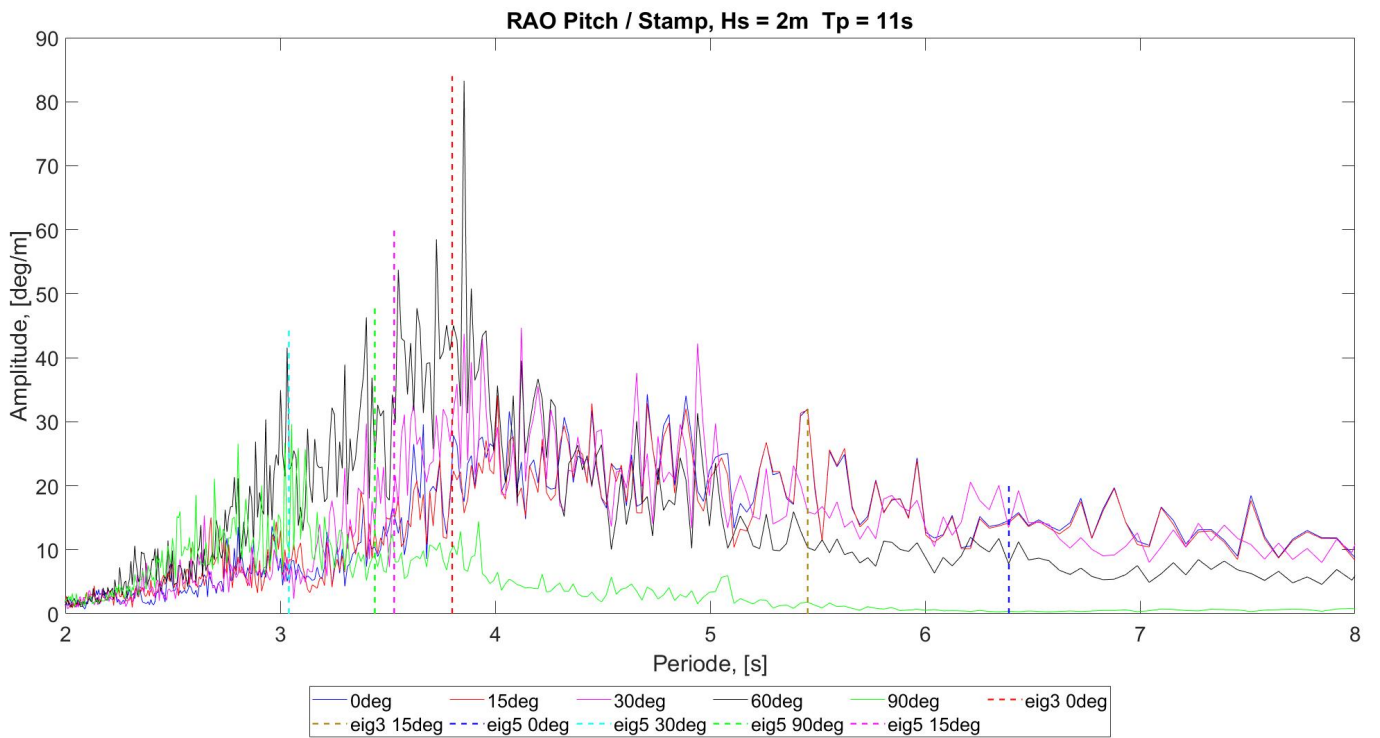
Figur 43: RAO hiv (forstørrelse)

3.2.3 Stamp

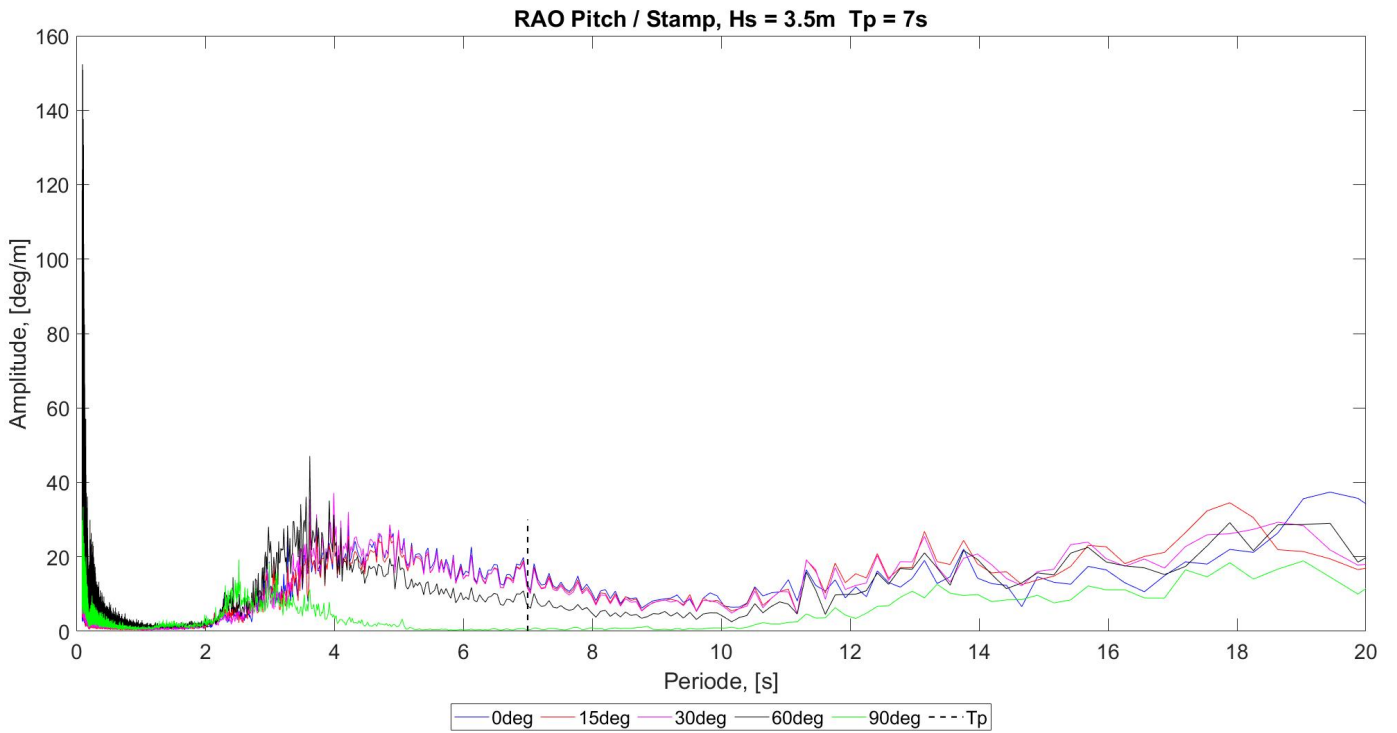
Responsen i stamp er for alle sjøtilstander lav. Dette kan skyldes at modellen er stiv, noe man observerte under decay-testene. Bølgene med retning på 90° har lavest respons i stamp, etterfulgt av bølger med retning på 60° som har noe høyere respons. Resterende bølgeretninger er nokså like. Egenperiodene fra fortøyningsystemet ligger mellom 2 og 4 sekunder. Både egenperiodene fra hiv og stamp ligger i dette området. Rundt bølgenes egenperiode er responsen lav.



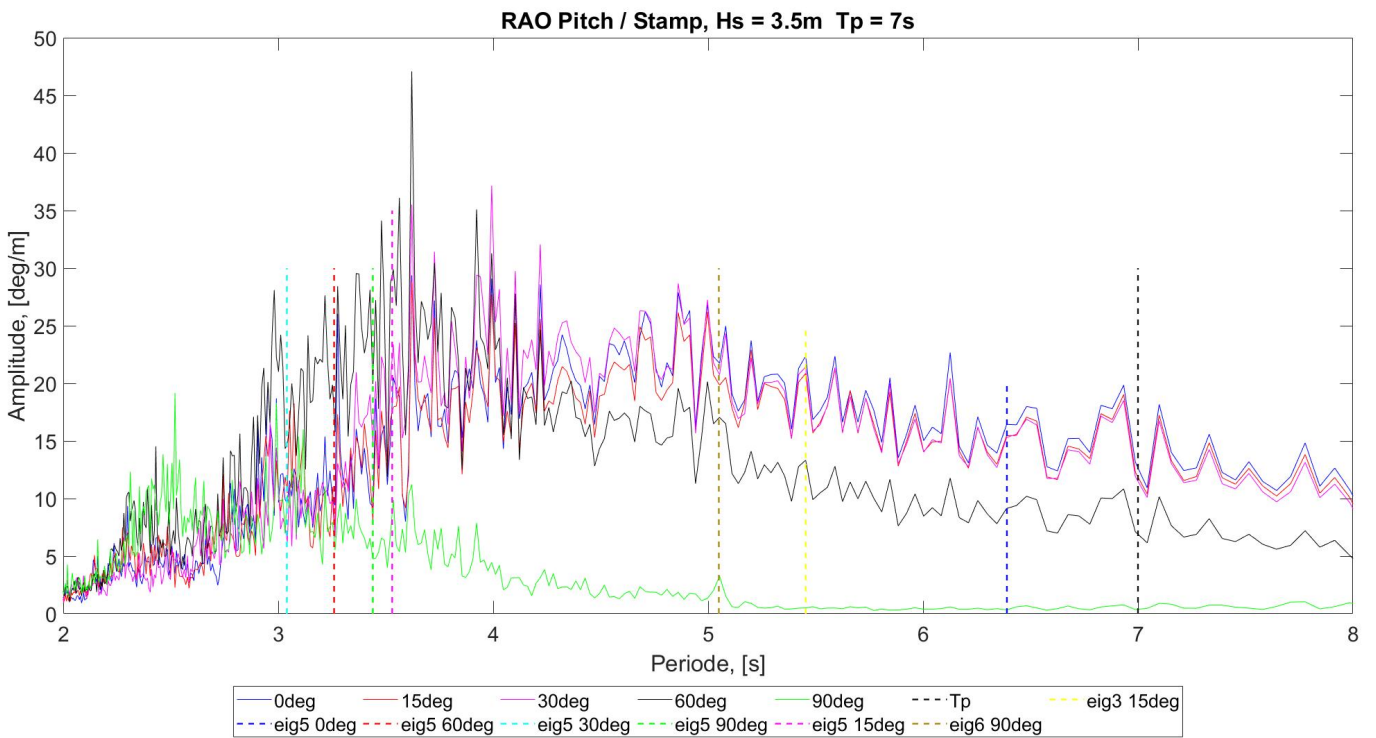
Figur 44: RAO stamp



Figur 45: RAO stamp (forstørrelse)



Figur 46: RAO stamp

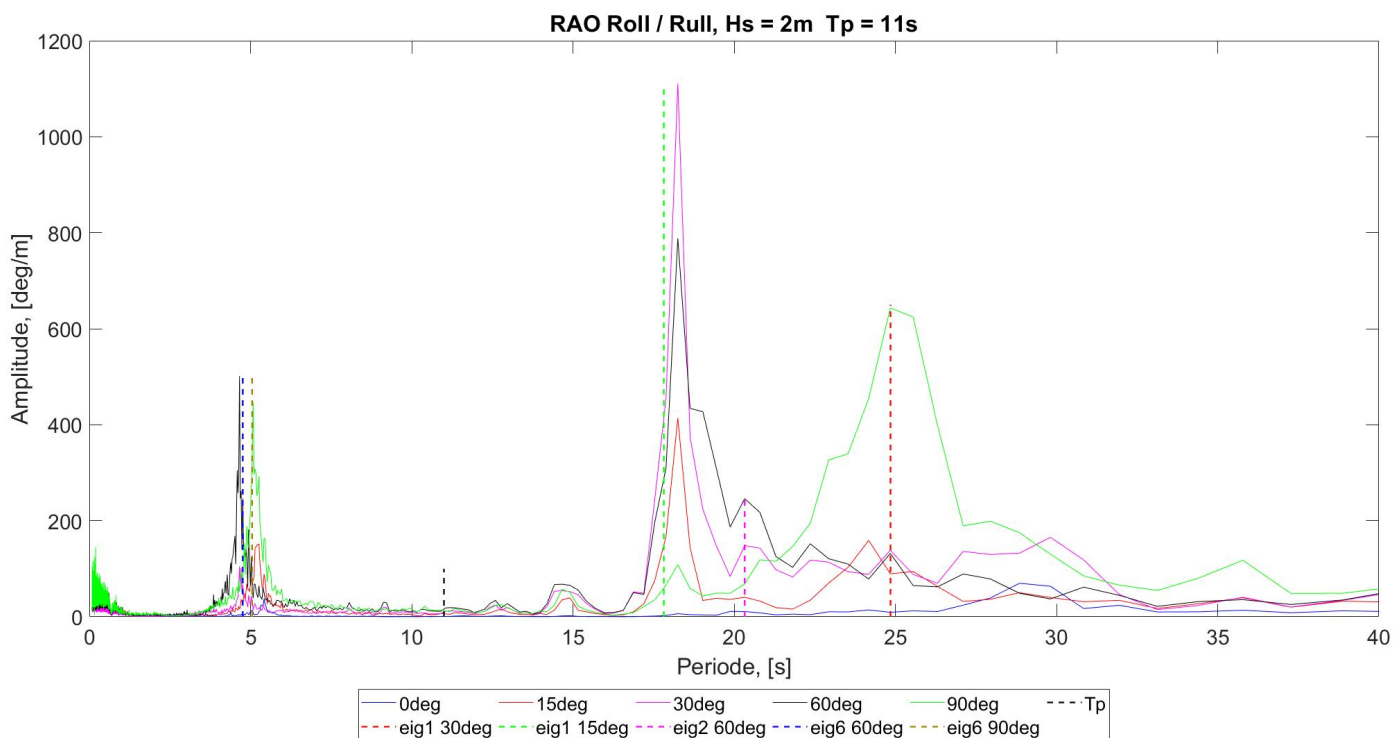


Figur 47: RAO stamp (forstørrelse)

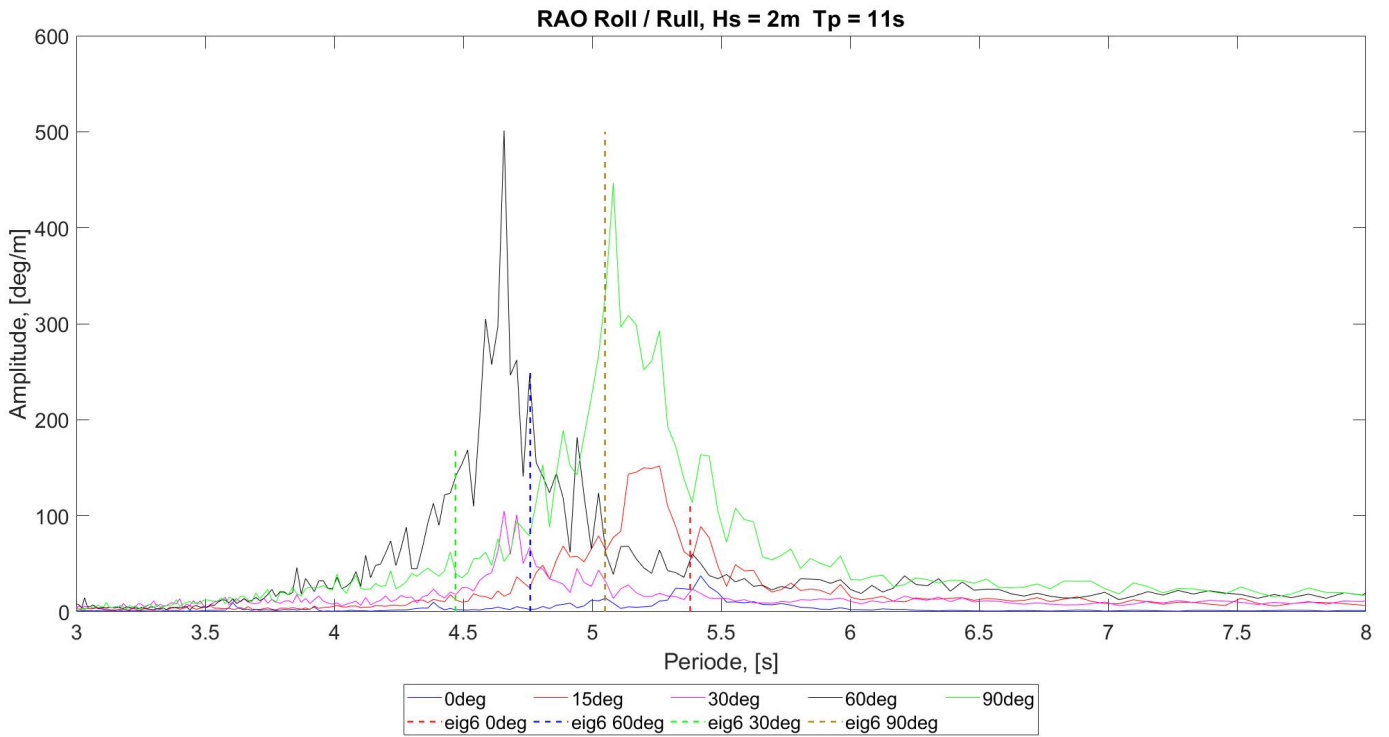
3.2.4 Rull

På samme måte som i stamp er det store likhetstrekk mellom sjøtilstandene for frihetsgraden rull. På forhånd forventet man størst respons i bølgeretning på 90° . Resultatene viser på tvers av alle sjøtilstandene at dette er tilfellet. Etterfulgt av 90° kommer bølgene med retning på 60° med noe lavere respons. Bølgeretningene på 0° har veldig lav respons, noe man også på forhånd forventet. Bølgeretningene på 15° og 30° har responsverdier mellom bølgeretningene på 0° og 90° . Med andre ord stiger responsverdien med økende vinkel på bølgene. Egenperioden til rull ligger rundt 5 sekund, som er utenfor bølgespekterintervallet.

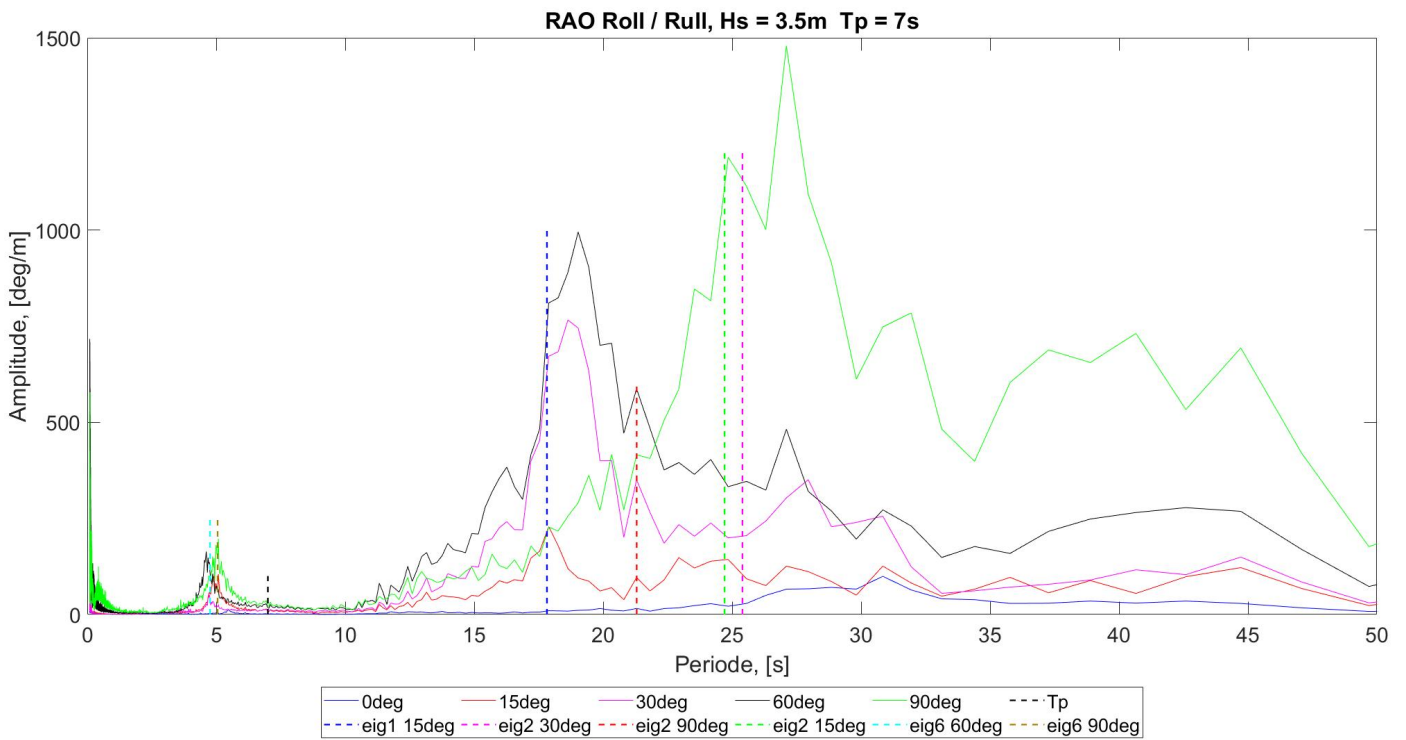
Av figuren under kan en se at egenperioder fra andre frihetsgrader dukker opp, noe som er typisk for RAO-grafer for frihetsgraden rull. Her dominerer egenperioden i jag ved bølgeretning på 15° .



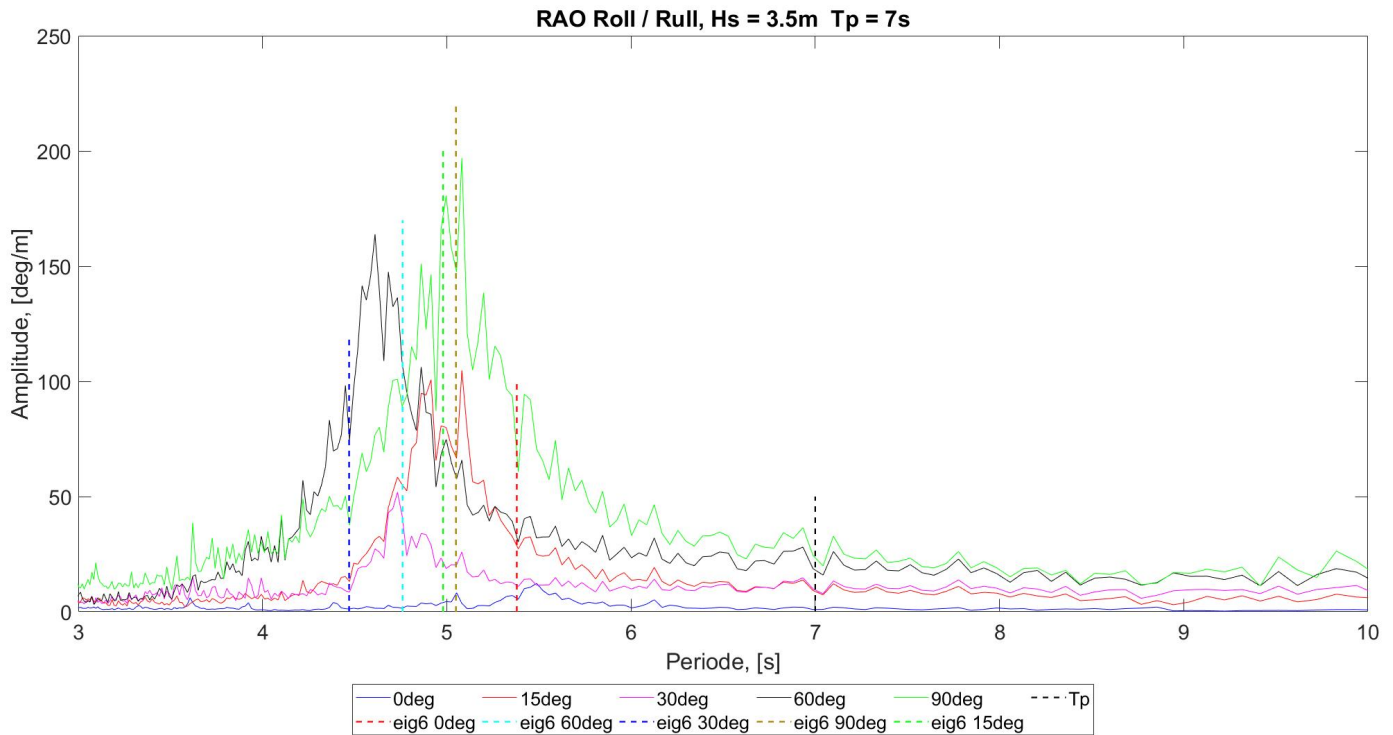
Figur 48: RAO Rull



Figur 49: RAO Rull (forstørrelse)



Figur 50: RAO Rull



Figur 51: RAO Rull (forstørrelse)

For å komme frem til hvilke bølgeretning som involverer minst risiko når det kommer til å trekke inn og sjøsette ROV må responsen i de ulike frihetsgradene sammenlignes. Når en sjøsetter en ROV vil det primært være lite gunstig med mye rullebevegelse. Her er som nevnt bølgeretninger på 90° og 60° dominerende. Dette er derfor bølgeretninger som bør unngås ved sjøsetting og inntrekking av ROV'en. Mye giring er heller ikke gunstig. For denne frihetsgraden gir bølgeretningene 60° og 30° størst utslag. For stampbevegelsen har bølgeretningene på 0°, 15° og 30° nokså lik respons, med høyere verdier enn resterende bølgeretninger. Hiv-bevegelsen er nokså lik i alle bølgeretningene.

3.3 Teoretiske resultater SINTEF

SINTEF har tidligere på oppdrag fra DeepOcean utført en numerisk analyse av USV'en [2]. Skrogutformingen av modellen som er testet i dette prosjektet er noe annerledes enn USV'en som SINTEF har analysert, men det er likevel interessant å sammenligne de teoretiske resultatene med de eksperimentelle. I dette prosjektet er fokuset på sjøtilstander med H_s på 2m og 3.5m. SINTEF-rapporten inkluderer kun RAO-grafer av 1m og 2m bølgehøyder.

Først og fremst har de eksperimentelle resultatene større amplitude enn de teoretiske resultatene. Ser en på frihetsgraden rull, er både den teoretiske og eksperimentelle egenperioden omtrent lik, men amplituden fra eksperimentell testing er større. Dette skyldes antakelig fortøyningssystemet som bidrar til å forsterke responsen til kunstig høye verdier rundt egenperioden.

SINTEF-rapporten inkluderer ikke RAO for hiv og stamp med bølgehøyde på 2m. Men dersom en studerer RAO-grafen for bølgehøyde på 1m, ligger egenperioden også her i samme område som de eksperimentelle resultatene. Amplituden er vesentlig større som følge av ulik bølgehøyde.

En kan i tillegg se samme mønster mellom de teoretiske og eksperimentelle kurvene når det gjelder hvilke bølgeretninger som gir mest og minst respons. For eksempel øker responsen i rull med økende vinkel på bølgene både i SINTEF-resultatene og de eksperimentelle resultatene. Se Figur 48 for eksperimentelt resultat.

Siden det er god sammenheng mellom de teoretiske resultatene fra SINTEF og de eksperimentelle resultatene fra dette prosjektet, styrkes troverdigheten til målingene utført i dette prosjektet.

4 Konklusjon

Hovedmålet med oppgaven var å finne bevegelsesresponsen til USV'en som DeepOcean har designet for ubemannede offshore operasjoner og vurdere hvilke bølgeretninger det er tryggest å sjøsette og trekke inn ROV'en. Delmål 1 bestod av å bygge modellen. Gjennom Delmål 2 ble modellens stabilitet bekreftet i henhold til design. Delmål 3 gjennomførtes seakeeping-tester i sjøtilstander typisk for Nordsjøen, etterfulgt av Delmål 4, hvor dataen fra seakeeping-testene ble post-prosесert og analysert.

Resultatene fra seakeeping-testene viser at det er en god sammenheng med reusultatene fra SINTEF-analysen. Dette styrker troverdigheten til de eksperimentelle resultatene.

Totalt sett har bølgeretning på 0° lavest respons i frihetsgradene hiv, stamp, gir og rull. Responsen i bølgeretning på 15° er relativt lik som bølgeretningen på 0° , men med noe høyere responsverdier i frihetsgradene gir og rull. Det er lite variasjon mellom responsverdiene i hiv for de ulike sjøtilstandene. Responsen i jag og svai er for alle tvers over lav.

Det er ikke utført tester med ROV tilstede og det er derfor vanskelig å direkte si noe om kollisjonsfaren mellom USV og ROV. Det ble derimot observert krappe bevegelser for sjøtilstanden med $H_s = 3.5\text{m}$ og $T_p = 7\text{s}$, noe som vil øke sjansene for kollisjon. Generelt er det beste å sjøsette og trekke inn ROV'en i så rolige sjøtilstander som mulig.

For å konkludere er det mest optimale å sjøsette og trekke inn ROV'en i bølgeretninger mellom 0° og 15° for å redusere risikoen for kollisjon mellom USV og ROV.

Referanser

- [1] DeepOcean. *Who we are*.
”<https://www.deeпоceangroup.com/about/about-us>”.
- [2] SINTEF. Numerical calculation of 6 dof motion raos for a small ship on behalf of deeпоcean as. 2021.
- [3] ITTC. Welcome to ittc.
”<https://ittc.info/>”.
- [4] Department of Mechanical and Marine Engineering. MainLab info sheet.
”<https://www.hvl.no/marinlab>”.
- [5] DNV. *DNV-RP-C205*.
”<https://www.dnv.com/oilgas/download/dnv-rp-c205-environmental-conditions-and-environmental-loads.html>”.
- [6] ITTC. *ITTC – Recommended Procedures*. Fresh Water and Seawater Properties.
- [7] A. Sayigh. *Comprehensive renewable energy*. Elsevier Ltd., 1043 NX Amsterdam, 2012.
- [8] K. A. Rosvold. Froudes tall.
”https://snl.no/Froudes_tall”.
- [9] H. Holm. *Havromsteknologi*. NTNU - Institutt for marin teknikk, 2008.
- [10] NTNU. Tmr4105 Marinteknikk Grunnlag, 2018. Kompendium.
- [11] Diesella. IP54 Digital protractor.
”<https://www.diesella.com/products/measuring-tools/squares/ip54-digital-protractor-4x90-51x51x32-mm-with-magnets-on-3-sides>”.
- [12] Physiscatalyst. Radius of gyration.
”<https://physiscatalyst.com/mech/radius-of-gyration.php>”.
- [13] Edinburgh Designs. Wave Gauges.
”<http://www4.edesign.co.uk/product/wavegauges/>”.
- [14] Qualisys AB, Gøteborg, Sverige. *Qualisys Track Manager*. 29.06.2011.
- [15] Edinburgh Design. Njord Wave Synthesis.
”<http://www4.edesign.co.uk/product/wave-generating-software/>”.
- [16] The MathWorks, Inc., Natick, MA. *ValidationRMSE*. Matlab help centre.
- [17] Appmeas. DBBSM-5kg-003-000.
”<https://appmeas.co.uk/products/load-cells-force-sensors/s-beam-universal-load-cell-dbbsm/>”.
- [18] Gloria Stenfelt. Introduksjon til Marinteknikk - MAS124.
”home.hvl.no/ansatte/gste/ftp/mas124;ntro_marinteknikk/Litteratur/Notater/Forelesningsnotater_GSHVL”.
- [19] The MathWorks, Inc., Natick, MA. *lsqcurvefit*. Matlab help centre.
- [20] B. Pettersen. *Marin Teknikk 3 Hydrodynamikk*. Akademika, 2022.
- [21] The MathWorks, Inc., Natick, MA. *pwelch*. Matlab help centre.

Vedlegg

