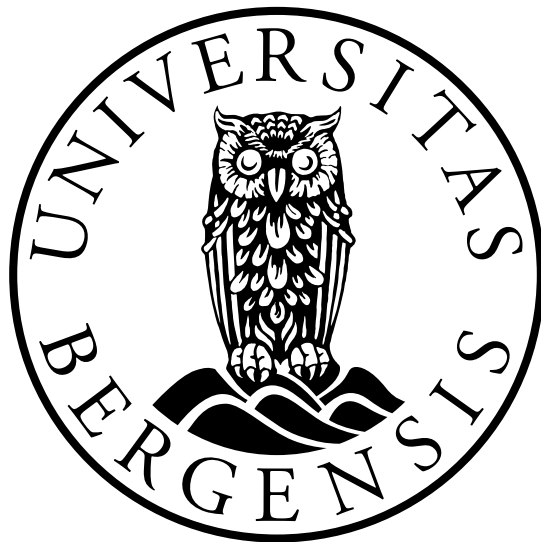


# Eksperimentelle analyser av forankringsløsninger for Egget<sup>®</sup>

Frida Klaussen



Masteroppgave i havteknologi

Universitetet i Bergen  
Institutt for fysikk og teknologi

Juni 2023



# Sammendrag

Havbruksnæringen i Norge er en voksende industri, som bidrar til å skape betydelige antall arbeidsplasser og inntekter i hele landet. Etterspørselen av oppdrettsfisk er stor både i inn- og utland, og industrien har økt i rekordfart. Miljøproblemene knyttet til oppdrett har vært en faktor som har påvirket næringen. Ny teknologi som lukket- og semilukket oppdrettsanlegg har skapt håp og nye muligheter for den norske havbruksnæringen. Innenfor disse typene av oppdrettsanlegg er det allerede flere prosjekter og mange av dem er godt i gang. En av dem er Hauge Aqua Solutions (OVUM AS) som har skapt Egget<sup>®</sup>. Lukket oppdrett i sjø krever en forankring som tåler belastningene fra de ytre kreftene som vind, strøm og bølger. En annen utfordring som havbruksnæringen og lukkede oppdrettsanlegg står ovenfor, er arealbruken som er forårsaket av fortøyning og forankring. Forslag til forankringsoppsett som krever mindre areal enn de tradisjonelle rammefortøyningene er et relevant tema.

Målet med oppgaven er å utføre eksperimentelle analyser av ulike forankringsløsninger til Egget<sup>®</sup>. De eksperimentelle analysene ble utført på MarinLab ved Høgskulen på Vestlandet. Fokuset har vært å utføre de eksperimentelle testene på en nøyaktig og repetitiv måte, slik at resultatene kan benyttes for videre forskning. Samtidig skal den eksperimentelle dataen overrekkes videre, slik at den numeriske dataen kan valideres.

Forankringsoppsettene som er blitt testet ut er rammefortøyning og ettpunktsforankring. Det er utført krengeprøve, decay-tester og regulære- og irregulære bølgetester. Det er utført en repetisjon for ettpunktsforankringen, hvor Egget<sup>®</sup> har et lokk på for å undersøke om sloshing har en innvirkning på resultatene. Lastcelldata er også målt for ettpunktsforankringen, og disse resultatene blir presentert og analysert.

På slutten av resultatdelen er det et sammenligningskapittel der rammefortøyningen sammenlignes med ettpunktsforankringen. Resultatene tilsier at bevegelsesdataene til rammefortøyningen vil ha en mindre påvirkning på systemet, enn ettpunktsforankringen. Det blir også sammenlignet eksperimentell data opp mot numerisk data. Det ble observert at sammenligningen mellom numerisk data og eksperimentell data gir et minimalt samsvar. Dette kan forklares av størrelsesforskjeller, og utfordringer med å se likhetene.

# Abstract

The aquaculture industry in Norway is growing, which helps to produce significant number of jobs and economic value throughout the country. The demand for farmed fish is high both at home and abroad, and the industry has grown at record speed. Environmental issues related to fish farming have been a factor that has affected the industry. New technology such as closed and semi-closed aquaculture facilities have created hope and new opportunities for the Norwegian aquaculture industry. There are already several projects related to these types of breeding facilities, with one of them being the Egg<sup>®</sup> by Hauge Aqua Solutions (OVUM AS). Closed fish farming in the ocean requires an anchorage that can withstand the stresses from external forces such as wind, current and waves. Another challenge facing the industry and closed aquaculture facilities is the land use caused by mooring and anchoring. Proposals for anchoring solutions that require less area than the traditional mooring frames are a relevant topic.

The aim of the assignment is to carry out experimental analyses of various anchoring solutions for the Egg<sup>®</sup>. The analyses have been carried out at MarinLab at the Western Norway University of Applied Sciences. The focus has been to carry out the experimental tests in an accurate and repetitive manner, so that the results can be used for further research. At the same time, the experimental data must also be handed over to, so that the numerical data can be validated.

The anchoring setups that have been tested are mooring frame and single point mooring. Inclination tests, decay tests, and regular and irregular wave tests have been carried out. The single point mooring test was repeated, with the Egg<sup>®</sup> having a lid on in order to check if sloshing has an effect on the results. Loadcell data has also been measured for the single point mooring. The results have been presented and analyzed.

At the end of the results sections there is a chapter comparing the mooring frame and the single point mooring. The results indicate that the movement data of the mooring frame will have a smaller influence on the system than the single point mooring. Experimental data are also compared against numerical data. It was observed that the comparison between numerical data and experimental data gives a minimal agreement. This can be explained by size differences, and challenges to observe the similarities.



## Forord

Denne masteroppgaven er skrevet som en avslutning på den toårige masterutdanningen havteknologi ved Universitetet i Bergen (UIB), skoleåret 2022/2023. Oppgaven er skrevet for Hauge Aqua Solutions, også kalt OVUM AS, og de eksperimentelle forsøkene er utført på MarinLab ved Høgskulen på Vestlandet (HVL). Der Høgskulen på Vestlandet og Universitetet i Bergen har et samarbeid om masterprogrammet. Masteroppgaven er levert til studiet havteknologi ved Institutt for fysikk og teknologi, ved Universitetet i Bergen.

Jeg vil utnevne en stor takk til veilederne mine, Gloria Stenfelt, førsteamanuensis ved HVL og MSc. Halvor L. Aga, for eksepsjonell hjelp og veiledning til masteroppgaven min. De har vært tålmodige og vært der når jeg trengte dem, under hele masterperioden. Vil også takke UIB-veileder, Harald Totland, førsteamanuensis, for gode og verdifulle tilbakemeldinger og tips på masteroppgaven min.

Jeg vil også takke de som var behjelpelig på MarinLab, spesielt Harald Moen og Nafez Ardestani, som har kommet med tips under testperioden.

Avslutningsvis vil jeg takke alle medstudentene mine, venner og familie, for uerstattelig støtte. Spesielt vil jeg rette en stor takk til medstudent Simen Emil Hansen for det fremragende samarbeidet i forbindelse med de numeriske verdiene som sammenlignes med de eksperimentelle dataene i min masteroppgave. I tillegg til at han var behjelpelig under store deler av utførelsen til de eksperimentelle testene på MarinLab.



# Innhold

<b>1</b>	<b>Innledning</b>	<b>1</b>
1.1	Bakgrunn og motivasjon . . . . .	1
1.2	Egget <sup>®</sup> . . . . .	2
1.3	Målsetting . . . . .	3
1.4	Gjennomføring . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Teori</b>	<b>5</b>
2.1	Frihetsgrader . . . . .	5
2.2	Skalering . . . . .	6
2.3	Hydrostatikk . . . . .	7
2.3.1	Fri væskeoverflate . . . . .	8
2.4	Bølgeteori . . . . .	10
2.4.1	Diffraksjonsteori . . . . .	11
2.4.2	Regulære bølger . . . . .	12
2.4.3	Irregulære bølger . . . . .	13
2.4.4	Responsanalyse . . . . .	15
2.5	Dynamisk respons . . . . .	16
2.5.1	Decay-test . . . . .	18
2.6	Forskrift om krav til flytende oppdrettsanlegg, NS9415 . . . . .	20
2.7	Sloshing . . . . .	20
2.8	Forankringsteori . . . . .	21
2.8.1	Linekarakteristikk . . . . .	21
2.8.2	Fortøyningsstivhet . . . . .	22
2.9	Forankringsoppsett . . . . .	23
2.9.1	Stramline- og slakkline forankring . . . . .	23
2.9.2	Rammefortøyning . . . . .	24
2.9.3	Ettpunktsforankring . . . . .	25
2.9.4	Hovedbestanddelene i et forankringssystem . . . . .	26
<b>3</b>	<b>Metode</b>	<b>30</b>
3.1	Eksperimentelt oppsett . . . . .	30
3.1.1	MarinLab . . . . .	31
3.1.2	Modell av Egget <sup>®</sup> . . . . .	32
3.1.3	Bølgehøydemåler . . . . .	34

3.1.4	Optisk kamerasystem . . . . .	35
3.2	Eksperimentelt oppsett . . . . .	36
3.2.1	Rammefortøyning . . . . .	36
3.2.2	Ettpunktsforankring . . . . .	39
3.3	Eksperimentell fremgangsmåte . . . . .	42
3.3.1	Krengeprove . . . . .	42
3.3.2	Decay-test . . . . .	44
3.3.3	Regulære bølger . . . . .	45
3.3.4	Irregulære bølger . . . . .	46
3.3.5	Lastcelle . . . . .	48
3.3.6	Oppdriftsbøye . . . . .	50
3.4	Databehandling . . . . .	51
3.4.1	Bølgekalkibrering-JONSWAP . . . . .	51
3.4.2	Valg av bølgehøydemåler . . . . .	52
3.4.3	Kurvetilpasning . . . . .	54
3.4.4	Frekvensplananalyse . . . . .	54
3.4.5	Databehandling av lastcelldata . . . . .	56
3.5	Feilkilder . . . . .	57
3.6	Begrensninger . . . . .	58
<b>4</b>	<b>Resultat og diskusjon</b>	<b>59</b>
4.1	Decay-tester . . . . .	59
4.1.1	Decay-tester uten fortøyning . . . . .	59
4.1.2	Decay-tester - rammefortøyning . . . . .	61
4.1.3	Decay-tester - ettpunktsforankring . . . . .	63
4.1.4	Sammenligning . . . . .	64
4.2	Regulære bølger . . . . .	65
4.3	Irregulære bølger . . . . .	66
4.3.1	JONSWAP - bølgespekter . . . . .	66
4.3.2	Resultater av JONSWAP-bølgene - rammefortøyning . . . . .	67
4.3.3	Resultater av JONSWAP-bølgene - ettpunktsforankring . . . . .	70
4.3.4	Lastcelldata . . . . .	74
4.3.5	White noise . . . . .	80
4.4	Sammenligning av begge oppsettene . . . . .	86
4.4.1	Sammenligning av rammefortøyning og ettpunktsforankring . . . . .	86
4.4.2	Samsvar med numeriske resultater . . . . .	91

<b>5</b>	<b>Konklusjon</b>	<b>96</b>
<b>6</b>	<b>Veien videre</b>	<b>98</b>
	<b>Referanser</b>	<b>99</b>



# 1 Innledning

## 1.1 Bakgrunn og motivasjon

Den norske havbruksnæringen har utviklet seg til en viktig eksportnæring for Norge, og er en viktig faktor innenfor bærekraftig mat [1]. Det startet på 1960-tallet da næringen gikk fra tilvenning av regnbueørret i ferskvann, til at Grøndtvedt-brødrene utviklet en åttekantet flytemerd. Det tok ikke lang tid før produksjonen av laksefiske vokste, og bare fra 2007 til 2017 var det en årlig vekst på 5.4 prosent [2]. Dagens oppdrettsnæring legger stor vekt på bærekraftig vekst og miljø, der næringen bruker mye tid og ressurser på å få til en bærekraftig og miljøvennlig oppdrettsnæring. Kjente problemer i dagens oppdrettsnæring er lakselus, rømming, høy dødelighet og fôrspill til omkringliggende miljø. Rømt laks kan ha stor betydning for villaksen som gyter i elvene, som igjen kan påvirke villaksens genmateriale. Lakselus er også et stort problem i oppdrettsnæringen idag. Den stresser og ødelegger skjellet til fisken som resulterer i at oppdretterne er nødt til å bruke mye ressurser på avlusning. Kjemikaliene og medisinen som benyttes kan være farlig for laksen og skadelig for miljøet. Dette bidrar også til økte kostnader.

Fôrspill og avfall kan påvirke omkringliggende miljø og havbunnen. Områder som er lite utsatt for strøm og vannutskiftning, kan få negative konsekvenser som endringer på havbunnen. Oppdretterne i Norge investerer store ressurser for å utvikle en teknologi som kan hjelpe til å redusere miljøavtrykkene som oppstår ved å ha oppdrettsanlegg i sjø. En slik nyutvikling er lukket anlegg i sjø. Et lukket anlegg har som hensikt å ta inn vann fra dypet, under det såkalte lusebeltet. Det lukkede anlegget er ikke 100 prosent lukket, siden det slipper ut vann og blir i mange tilfeller kalt semi-lukket [3]. Et lukket anlegg skiller seg også fra et RAS-anlegg eller gjennomstrømnings anlegg på land. Dette på grunn av den omfattende renseteknologien til RAS-anleggene. Et RAS-anlegg er et lukket oppdrettsanlegg på land. Ved å ha et flytende lukket oppdrettsanlegg i sjø er det flere forhold som må bli lagt vekt på, og et av dem er forankringsløsninger. For at anlegget skal unngå havari, må den være forankret til havbunnen, og ha en fortøyning som holder anlegget stabilt. Et forslag fra Fiskeri- og havbruksnæringens forskningsfond (FHF) er at næringen skal få et bedre grunnlag til å utvikle mindre arealkrevende løsninger for forankringssystemer [4]. Denne problematikken har blitt jobbet mot de siste årene og det har hittil vært uklart om mindre arealbruk vil føre til økt kostnad [4]. En annen problemstilling innenfor det hydrodynamiske synspunktet for lukkede anlegg idag er anleggets følsomhet for bølger. Systemets stivhet spiller en betydelig rolle, der det primære fokuset er på å kartlegge egenbevegelsene og identifisere de bevegelsene som skaper sloshing-effekten inne i modellen [5].

## 1.2 Egget<sup>®</sup>

Hauge Aqua ble etablert i 2012 og er et firma som har som mål å utvikle og drive en virksomhet innenfor havbruk og teknologi, som skal drives bærekraftig og økonomisk. Datterselskapet til Hauge Aqua er Hauge Aqua Solutions AS (HAS) og ble stiftet i 2016. Hauge Aqua Solutions er teknologidelen av Hauge Aqua, og som nå har byttet navn til OVUM AS. Forretningsmodellen til OVUM AS er Egget<sup>®</sup> i en postsmoltversjon, og de holder stadig på å utvikle den. Modellen befinner seg nå i testfasen ute i havet. Egget<sup>®</sup> er et lukket oppdrettsanlegg som er utformet som et egg, der materiale er av sammensatt sandwichkompositt. Nitti prosent av anlegget er nedsenket og ti prosent er over vannet. Egget<sup>®</sup> har som hensikt å tilføre en bærekraftig vekst til havbruksnæringen. Målet er null lakselus og rømning, og unngå fôrspill og avfall til omkringliggende miljø [6].

Egget<sup>®</sup> skal erstatte de sirkulære notmerkene og skal støttes av fôrflåte og elektrisk kraft. Ved hjelp av to pumper blir innløpsvannet til Egget<sup>®</sup> pumpet inn og ved en sirkulasjonsordning inne i modellen blir vannet ført oppover. Vannet vil da gå ut ved toppen av modellen. Inne i Egget<sup>®</sup> blir lysforhold, vannkvalitet, fôring, oksygen, avfall og strømningsforhold kontrollert. Kontroll av fôring og organisk avfall er noe Hauge Aqua har stort fokus på. Egget<sup>®</sup> er fortøyd horisontalt inn i et eksisterende fortøyningsystem i en gård [6]. Figur 1 viser en tegning av Egget<sup>®</sup> og hvordan det kan se ut innvendig.



Figur 1: Illustrasjon av hvordan det kan se ut på innsiden til Egget<sup>®</sup> [6].



### 1.3 Målsetting

Problematikken rundt forankringsløsninger i dagens næring er alt fra beslaglegging av havbunnen til arealkonflikt, kostnader og vedlikeholdsbehov. Ved å ta i bruk et lukket anlegg kan arealbehovet minimeres, men her vil det igjen være viktig å ha en stabil og sikker forankringsløsning. Grunnen til dette er at et lukket anlegg i sjø skiller seg vesentlig fra tradisjonelle åpne merder i sjø. Forskjellene går inn på de hydrodynamiske perspektivene [3]. Dette vil si alt fra bølgekrefter til påvirkningen av havstrømmen på konstruksjonen. I denne oppgaven blir det fokusert på bølgekraften sin påvirkning på Egget<sup>®</sup>.

Problemstillingen som oppgaven baserer seg på er: Eksperimentelle analyser av forankringsløsninger for Egget<sup>®</sup>. Målet med oppgaven er å etablere forsøkene, og gjennomføre eksperimentene slik at de har en høy grad av repeterbarhet og kan gjenspeile virkeligheten. Oppgaven har som hensikt å analysere to ulike forankringsløsninger til Egget<sup>®</sup> slik at OVUM AS har et innspill til videre forskning. De eksperimentelle testene skal foregå i MarinLab, som ligger på Høgskulen på Vestlandet. Samtidig skal denne masteroppgaven overrekke eksperimentell data videre, for å validere numeriske data til en parallell masteroppgave [7]. Dette er en del av prosessen for å forbedre analysemetoder i fremtiden. I Figur 2 blir det illustrert en av de to forankringsoppsettene som blir testet ut i MarinLab. Dette forankringsoppsettet er en rammefortøyning og det presenteres hvordan modellen av Egget<sup>®</sup> ligger i tanken.



Figur 2: Egget<sup>®</sup> i en rammefortøyning i MarinLab.

## 1.4 Gjennomføring

Oppgaven skal gjennomføres med en eksperimentell metode i MarinLab. Ved hjelp av numeriske verdier fra den parallelle masteroppgaven [7], skal en tradisjonell rammefortøyning sammenlignes med en ny type forankring. De numeriske verdiene som benyttes omfatter hydrostatisk data, oppdriftsbøye informasjon og resultater fra Syy- og RAO-data. Den andre forankringen som skal testes er ettpunktsforankring. Funn i artikkelen fra Huang et al. (2020) viste at ettpunktsforankring ga store vertikale bevegelser [8]. Med utgangspunkt i dette ble det fremstilt en hypotese om at Egget<sup>®</sup> vil bevege seg mer i en ettpunktsforankring enn i en rammefortøyning. I forbindelse med testene vil det benyttes en modell av Egget<sup>®</sup> som er laget av tidligere studenter ved Høgskulen på Vestlandet. Modellen består av glassfiber-skall og et lag med gelcoat på utsiden [9]. Etter å ha gjennomført de to forankringsoppsettene i MarinLab skal resultatene analyseres i beregningsverktøyet MATLAB, versjonen R2021a [10]. I metodekapittelet blir de hydrostatiske verdiene undersøkt, og de vil bli sammenlignet med de numeriske verdiene. Fra den parallelle masteroppgaven [7], ble de numeriske verdiene hentet ut fra et program som heter SESAM [11].

Testene som skal utføres på forankringsoppsettene i MarinLab er:

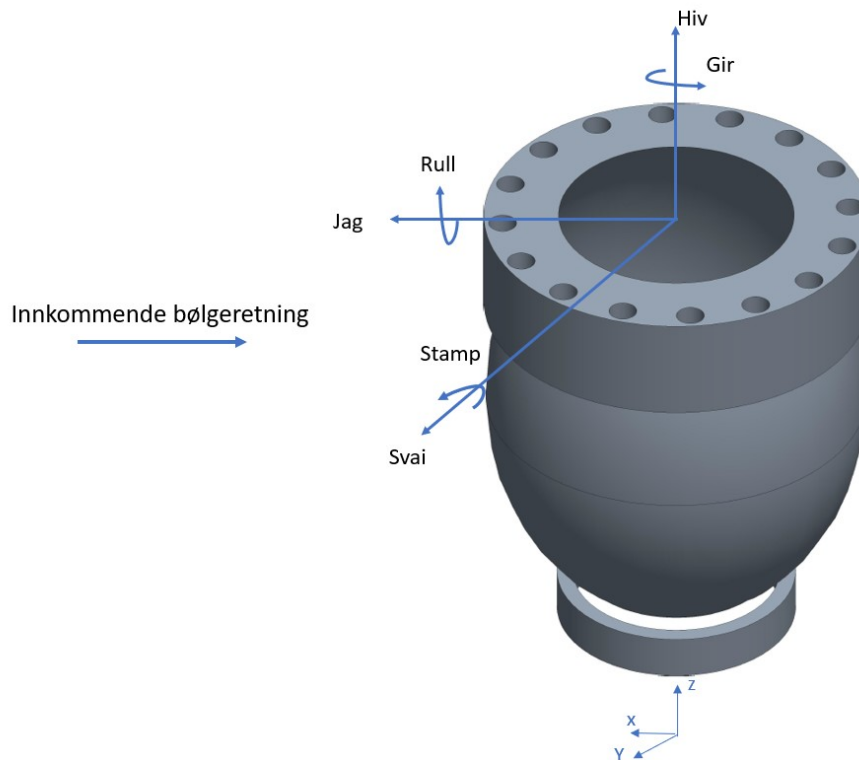
- Krengeprøve
- Decay med og uten fortøyning
- Regulære- og irregulære bølgetester

## 2 Teori

I dette kapitlet skal teorien for masteroppgaven presenteres. De første delkapitlene omhandler frihetsgrader, skalering og hydrostatikk, som er viktig for Egget<sup>®</sup> sin bevegelse og form. Videre handler teorien om bølge-teori i form av diffraksjonsteori, regulære- og irregulære bølger. Det blir også sett på den dynamiske responsen og forholdet til Egget<sup>®</sup>, som et dempet system. Forankringsteori er et sentralt tema som også blir tatt opp i teorien, og hovedparameterne i et forankringsoppsett.

### 2.1 Frihetsgrader

I et tredimensjonalt rom er det seks frihetsgrader, og finnes i tre dimensjoner. De tre dimensjonene ligger i  $X$ ,  $Y$  og  $Z$ -planet. Frihetsgradene er jag, svai, hiv, gir, stamp og rull. Jag, svai og hiv er translasjoner mens gir, stamp og rull er rotasjoner rundt translasjonsaksene. Frihetsgrader er viktig for å kunne forutse hvordan et flytende legeme beveger seg i et åpent hav, med påvirkninger av ytre krefter som vind, bølger og strøm. Frihetsgradene til Egget<sup>®</sup> blir illustrert i Figur 3 med innkommende bølgeretning.



Figur 3: De seks frihetsgradene som blir illustrert på Egget<sup>®</sup>.

## 2.2 Skalering

Skalering er en fremgangsmåte for å justere en størrelse. For å sammenligne og utvikle store konstruksjoner, må en teste det i en mindre målestokk. Dette krever at modellen i fullskala må skaleres ned. Ved å skalere en tallverdi ned må modelltester være representative i fullskala i forhold til hverandre. Likhetene kan deles inn i tre følgende måter:

- Geometrisk likhet
- Kinematisk likhet
- Dynamisk likhet

### Geometrisk likhet

Blir oppnådd ved at en romslig dimensjon skaleres og forteller om hvordan en testmodell kan skaleres opp eller ned i forhold til en fullskala modell. Det er nødvendig å merke seg at konstruksjonen skal ha like geometriske forhold i sammenheng med formlikhet. Dette er for å sikre seg nøyaktig og pålitelige resultater etter skaleringen.

### Kinematisk likhet

For å oppnå kinematisk likhet må strømmingen rundt et legeme være lik. Dette er viktig for grenselaget nær kroppsoverflaten. Det er to forskjellige strømmingstyper som må bli tatt hensyn til, og det er laminær- og turbulent strømming. Forholdet må være tilsvarende lik mellom hastigheter i modellskala til forholdstallene i sin helhet [12].

### Dynamisk likhet

Forteller om innkommende bølger og bølgemønstre som blir skapt av objekter. Dette burde bli skalert til modellstørrelse. Dynamisk likhet eksisterer hvis forholdene mellom kreftene som virker på de homogene væskepartiklene og grenseoverflatene er konstante [13].

I Tabell 1 presenteres skaleringslovene som er brukt. Grunnen til at Froudes skaleringslov benyttes er på grunn av den kan brukes for å bestemme dimensjonene til en modell for de fleste modelltester [14]. Skaleringsformelen som blir benyttet i denne oppgaven er:

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

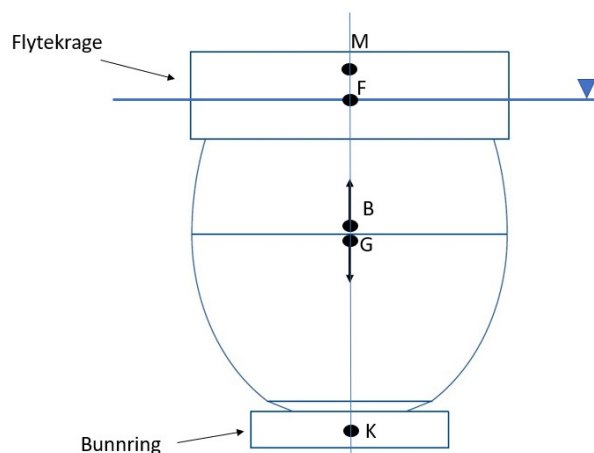
der  $L_f$  er fullskala modell og  $L_m$  er modellskala.

Tabell 1: Froude skalering og parameterene [15].

Parameter	Enhet	Skaleringsfaktor
Lengde	[m]	$\lambda$
Strukturell masse	[kg]	$\lambda^3 \rho_F / \rho_M$
Kraft	[N]	$\lambda^3 \rho_F / \rho_M$
Moment	[Nm]	$\lambda^4 \rho_F / \rho_M$
Akselerasjon	[m/s <sup>2</sup> ]	$a_F = a_M$
Tid	[s]	$\sqrt{\lambda}$
Trykk	[Pa=N/m <sup>2</sup> ]	$\lambda \rho_F / \rho_M$

## 2.3 Hydrostatikk

For å kunne utføre tester på MarinLab er bakgrunnskunnskaper om hydrostatikk viktig å ha, spesielt når en krengeprøve skal bli utført. Hydrostatikk er ikke bare viktig for testing, men også for statiske stabilitetsberegninger. En viktig lov innenfor hydrostatikk er Arkimedes lov. Den sier at en gjenstand som er fullt eller delvis neddykket i væske, vil få en oppdrift som er lik tyngden av væskemengden som gjenstanden fortrenger [16]. Dette er igjen viktig for oppdrift, som blir nevnt under metode i 3.3.6. I Figur 4 blir det illustrert hvor på Egget<sup>®</sup> de ulike hydrostatiske parameterne befinner seg og hvor flytekragen og bunnringen er plassert.



Figur 4: Plasseringen til de hydrostatiske parameterne på Egget<sup>®</sup>.

Her er  $M$  metasenter,  $F$  er flotasjonsenter,  $G$  er tyngdepunktet,  $B$  er oppdriftssenter og  $K$  er kjøll.  $K$  er valgt i bunnen av Egget<sup>®</sup>, og ikke bunnringen, som det kan se ut som i Figur 4.  $M$  som er metasenter er skjæringspunktet mellom gammel og ny oppdriftsline og dette gjelder når skipet krenger med en vinkel  $\phi$ . Metasenteret sin beliggenhet er avhengig av hvor oppdriftssenteret  $B$  ligger i forhold til skipets form. Som regel ligger  $G$  over punktet  $B$ , men i Egget<sup>®</sup> sitt tilfelle er dette motsatt.  $GM$  er avstanden fra skipets tyngdepunkt ( $G$ ) og til metasenteret ( $M$ ) kalles Metasenterhøyden [17].  $GM$  er gitt som:

$$GM = KB + BM - KG . \quad (2)$$

Fra Ligning 2 er  $KB$  avstanden fra kjøll til oppdriftssenter og  $BM$  er avstanden fra oppdriftssenter til metasenter, og er avhengig av treggheten i vannlinjearealet [17].  $KG$  er avstanden fra kjøll til tyngdepunktet, og en viktig faktor som  $KG$  avhenger av er ballasteringen på modellen. Et legeme vil bli mer stabilt ved et større arealtregghetsmoment.  $KB$  og  $BM$  kan også skrives som  $KM$ , og er avstanden fra kjøll til metasenter. Der parameteren  $KM$  er viktig i forhold til skipets stabilitet.  $KM$  er avhengig av formen til modellen som blir benyttet og kan brukes for å bestemme skipets evne til å motstå krefter, i forhold til krenkning.  $KM$  kan også skrives som  $KM = KB + BM$  [18].

### 2.3.1 Fri væskeoverflate

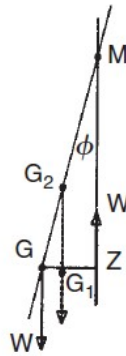
For en lukket konstruksjon som skal inneholde væske er det flere parametere å ta hensyn til. Væsken som er inne i den lukkede konstruksjonen vil påvirke tyngdepunktet og stabiliteten. En liten vinkel på hellingen kan påvirke væskeoverflaten til modellen, slik at stabiliteten påvirkes negativt. For Egget<sup>®</sup> blir stabiliteten regnet med hensyn på at Egget<sup>®</sup> er lukket, selv om det er små hull i bunnen. De små hullene er der for at Egget<sup>®</sup> skal stabilisere seg med vannmassen. I vannmassen er det viktig å ta hensyn til det neddykkede vannvolumet som er inkludert i vannet.

En annen viktig parameter er  $GG_2$ , og er fri overflateeffekt [18]. Den kan påvirke den flytende modellen slik at væsken innvendig kan legge seg usymmetrisk, og gjøre den mindre stabil. Dette skjer ved at væsken forflytter seg inne i konstruksjonen ved en viss krenkning. Ligningen for  $GG_2$  kan skrives som  $GG_2 = \frac{\rho_f I}{\rho \Delta}$  [18]. Hvor  $\rho_v$  er fri væsketetthet,  $I$  er arealtregghetsmomentet for fri væskeoverflate og  $\Delta$  er deplasementet som er vekten av konstruksjonen og indre vannvolum. Arealregghetsmomentet  $I$  for en sirkel blir skrevet som  $I = \frac{\pi d^4}{64}$  [19], der  $d$  er indre diameter av vannlinjeoverflaten.

Fri væskeoverflate sier noe om frittflytende væske og hvor stor betydning det har for en konstruksjon når den er lukket. Hvis  $GG_2$ -verdien blir for høy, kan utfallet bli at  $GM$ -verdien blir negativ, og legemet kan krenge i en stor vinkel [18]. Ligningen for  $GM$  blir da

$$GM = KB + BM - KG - GG_2 . \quad (3)$$

Fri væskeoverflate har stor betydning for stabiliteten til en konstruksjon i vann i forhold til tyngdepunkts plasseringen. Endringen av tyngdepunkts plasseringen, kan ha et stort utfall for konstruksjonen. Parameteren  $G_2$ , som også kan skrives som  $GG_2$  vil bli dannet rett ovenfor  $G_1$  og dette vises i Figur 5.



Figur 5: Fri væskeoverflate med illustrasjon av  $GG_2$  [18].

## Krengepørve

Alle fartøy og konstruksjoner må gå igjennom en krengepørve hvis de skal ut på havet. Dette er nødvendig for å vite at konstruksjonen er stabil og har korrekt tyngdepunkt. En krengepørve er med på å måle stabiliteten, tyngdepunktet og tyngdepunkts plasseringen.  $GM$ -verdien i en krenget tilstand er:

$$GM = \frac{M_k}{\Delta \tan \Phi} , \quad (4)$$

der  $M_k$  er krengemomentet og  $\Delta$  er den totale vekten til modellen og deplasementet i kg [20]. Ligning 4 blir benyttet i metodekapittelet 3.3.1.

## 2.4 Bølgeteori

For å forstå bølgeteori er det viktig å vite hva en bølge er. Kort forklart så er det et signal som forplanter seg fra en del av et medium til en annen del med en karakteristisk hastighet. Signalet kan være hvilken som helst forstyrrelse, og som kan identifiseres, slik at posisjonen kan bestemmes til enhver tid [21]. Ytre krefter som vind og strømninger vil påvirke bølgen. Bølgekrefter er viktig å ha kontroll på, spesielt når en skal teste marine konstruksjoner. Ved å se det fra et hydrodynamisk synspunkt er det viktig å skille konstruksjoner opp i storvolum eller småvolum. Denne oppgaven vil bare fokusere på storvolum konstruksjon. En storvolum konstruksjon forteller om konstruksjonens evne til å generere bølger, da dette er viktig ved beregning av krefter [22].

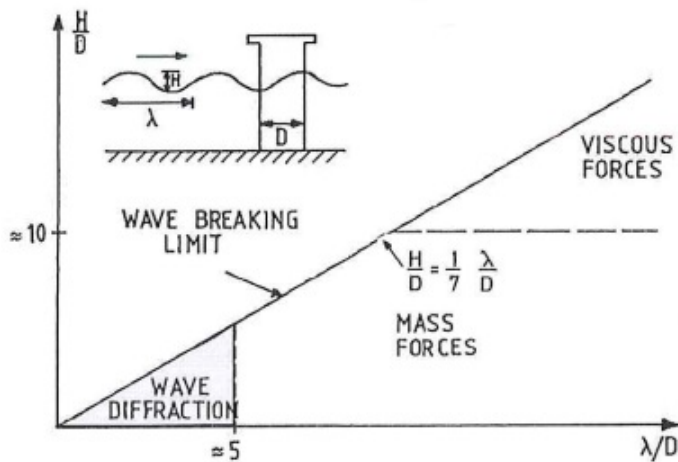
For å forstå bølgeteori er det ulike temaer som vil bli gjennomgått, og det er:

- Diffraksjonsteori
- Regulære bølger
- Irregulære bølger
- Response Amplitude Operator (RAO)



### 2.4.1 Diffraksjonsteori

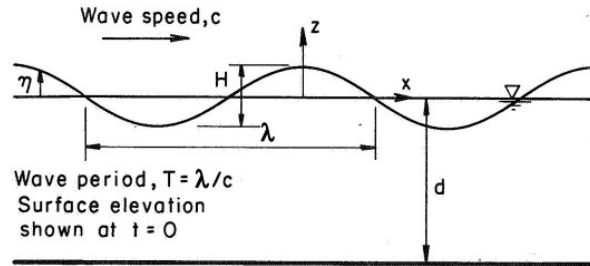
Siden Egget<sup>®</sup> er en storvolum konstruksjon, kan ikke Morison's ligning bli brukt. Morison's ligning blir bare anvendt ved småvolum konstruksjoner, dermed må diffraksjonsteorien bli benyttet. Når krefter estimeres av Morison's ligning, vil treghetskrefter domineres ved moderate bølgehøyder. Dragkrefter vil derimot dominere ved store bølgehøyder [17]. Diffraksjonsteorien fastslår at uavhengig om bølgen er regulær eller irregulær, kan den reflekteres tilbake når den til slutt treffer konstruksjonen. I det bølgen treffer konstruksjonen vil de bølgene som er i nærheten av konstruksjonen bli bøyd og forårsake en effekt som vil påvirke bølgen. Diffraksjonsteorien er anvendelig for storvolum konstruksjon når  $\pi \frac{D}{\lambda} > 0.5$  [17]. Fra Figur 6 blir det illustrert bruksgrensene til småvolum- og storvolum konstruksjoner. Der  $H$  er bølgehøyde,  $D$  er sylindrens diameter og  $\lambda$  er bølgelengden. Figur 6 er basert på en horisontal bølgekraft på en vertikal sylinder som står på havbunnen [23].



Figur 6: Bruksgrenser til små- og store konstruksjonssoner [23].

## 2.4.2 Regulære bølger

Når bølger beveger seg i samme mønster over en viss tid, blir de kalt regulære bølger. Disse bølgene forekommer også periodisk og opptrer i samme mønster som uttrykt ved sinus og cosinus. Ettersom regulære bølger ikke oppstår ute i havet, er det ikke en ideell sammenhengning. Regulære bølger er derimot gunstig når ulike kalibreringstester og andre bølgetester skal bli utført på laboratoriet. I Figur 7 illustreres det en regulær bølge.



Figur 7: Regulær bølge som viser de ulike parameterne som er essensielle [24].

Ligningen som brukes til regulære bølger, er også ligningen for bølgehevning. Antatt at det er dypt vann, ser ligningen for overflatehevning slik ut

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

der  $\zeta_a$  er bølgens amplitude [22]. I tilfeller ved regulære bølger vil amplituden være halvparten av bølgens høyde. I Ligning 5 er  $\omega t$  den delen av fasen som er tidsavhengig og er vinkelfrekvensen med ligningen  $\omega = 2\pi f$ . Der  $2\pi$  konverterer radianer per sekund om til frekvens i hertz, og  $f$  er frekvensen. Bølgetallet er  $k$  og har ligningen [24].

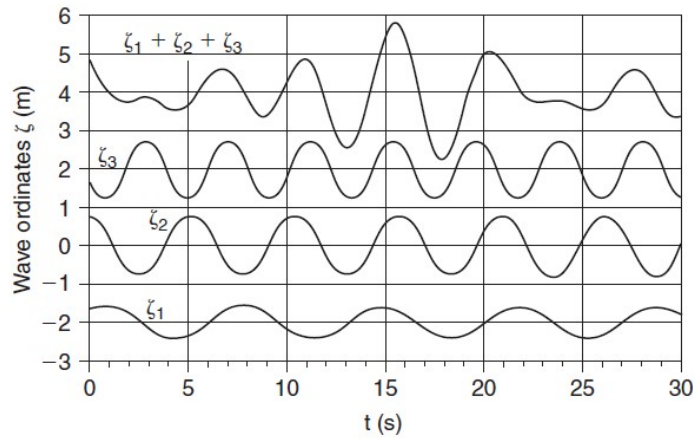
$$k = \frac{2\pi}{\lambda} . \quad (6)$$

### 2.4.3 Irregulære bølger

Irregulær sjø er vindgenererte bølger, som oppfører seg som en stokastisk prosess. Dette betyr at forløpet av overflatehevingene ikke kan bestemmes [22]. Denne type bølger er de reelle bølgene som er ute i havet, og formen kan oppstå tilfeldig. Bølgene kan ha ulike amplituder, perioder og frekvenser. For å beskrive en irregulær bølge kan en se for seg et to-dimensjonalt bevegelsesbilde [22], der overflatehevingen er gitt ved

$$\zeta(x, t) = \sum_{n=1}^N \zeta_{An} \cos(\omega_n t - k_n x + \epsilon_n) . \quad (7)$$

Der  $N$  er antallet bølgefrequenser,  $\zeta_{An}$  er amplituden til en enkeltbølge og  $\epsilon_n$  er en fasevinkel mellom 0 og  $2\pi$ . For å beregne  $\omega$  er det viktig å vite om det er endelig eller dypt vann. En irregulær bølge blir illustrert i Figur 8.



Figur 8: Illustrering av en irregulær bølge fra summen av de regulære bølgene [18].

I denne masteroppgaven skal to ulike irregulære bølger bli tatt hensyn til, og det er JONSWAP- og white noise-bølger. Et bølgespekter er med å avgjøre utseende og beskrive en sjøtilstand. For å få ut et bølgespekter blir det tatt målinger med en bølgehøydemåler for å få ut bølgehøyder, perioder og frekvenser. Det finnes mange ulike former på bølgespekter, og to av de mest kjente er Joint North Sea Wave Project (JONSWAP) og Pierson-Moskowitz (PM).

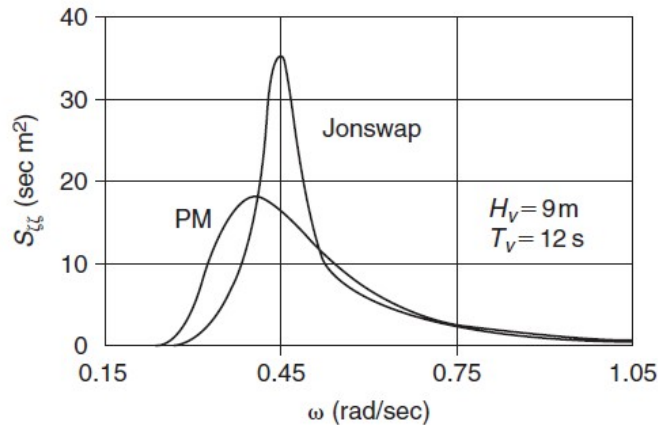
Et bølgespekter blir definert som:

$$\frac{1}{2}\zeta_{AN}^2 = S(\omega_n)\Delta\omega , \quad (8)$$

hvor  $\zeta_{AN}$  er amplituden til den lineære bølgekomponenten som har en vinkelfrekvens  $\omega_n$  [22].  $S(\omega)$  er arealet innenfor et lite frekvensintervall og  $\Delta\omega$  er et frekvensbånd, og er lik energien til alle komponenter innenfor dette intervallet [22]. Pierson-Moskowitz er et spekter som brukes for fullt utviklet hav og for åpent dypt vann. JONSWAP-spekteret derimot er for voksende hav og har en spissere topp enn Pierson-Moskowitz-spekteret. I denne masteroppgaven brukes bare JONSWAP-spekteret til sammenligning med eksperimentelt målt bølgespekter som kommer fra de irregulære bølgene. Ligningen for et JONSWAP-spekter blir illustrert i Ligning 9 [25].

$$S_J(\omega) = A_\gamma \cdot S_{PM}(\omega) \cdot \gamma^{\exp(-0.5(\frac{\omega-\omega_p}{\sigma\omega_p})^2)} , \quad (9)$$

der  $A_\gamma$  er en normaliserende faktor,  $S_{PM}(\omega)$  er Pierson-Moskowitz spekteret og  $\gamma$  er en ikke-dimensjonal toppformparameter [25]. I Ligning 9 er  $\omega_p$  vinkelspektral toppfrekvens og  $\sigma$  er spektral breddeparameter. En illustrasjon av Pierson-Moskowitz-spekteret og JONSWAP-spekteret presenteres i Figur 9.



Figur 9: Illustrasjon av JONSWAP sammenlignet med et Pierson-Moskowitz-bølgespekter [18].

## White noise-bølger

Den siste bølgen som skal bli analysert innenfor de irregulære bølgene er white noise-bølger og kalles også for hvit støy. For bølgespekteret til white noise-bølger så antas det at bølge-energiens spektraltetthet,  $S(\omega)$  er jevnt fordelt. Dette betyr at spektraltettheten har en konstant verdi over en bred del av bølgefrequensområde [26]. Dette tilsier at  $S(\omega) = S_0$ . I Ligning 10 blir det illustrert den signifikante bølgehøyden  $H_s$  sitt forhold til spektraltettheten  $S(\omega)$  [26].

$$H_s = 4\sqrt{\int_0^\infty S(\omega) d\omega} = 4\sqrt{\int_{\omega_a}^{\omega_b} S_0 d\omega} = 4\sqrt{S_0(\omega_b - \omega_a)} \quad (10)$$

Her er  $\omega_b$  og  $\omega_a$  bølgefrequensområdet, og står for de øvre og nedre grensene for integrasjonen av spektraltettheten [26].

### 2.4.4 Responsanalyse

For å kartlegge oppførselen til konstruksjonen med irregulære bølger, blir et responspekter beregnet, basert på innkommende bølger og respons. RAO står for responsamplitude-operator og indikerer en sammenheng mellom responsamplituden og inngangsbølgeamplituden [12]. Samtidig vil den referere til hver av de seks frihetsgradene. Begrepet RAO blir delt opp i to deler, der respons-amplitude referer til graden av bevegelse som er induert i et flytende fartøy. Den oppstår av en passerende hydrodynamisk bølge. Den andre delen er operator og er en faktor som må multipliseres, med en bestemt verdi, der verdien eksempelvis kan være bølgehøyden [27]. En RAO er en overføringsfunksjon og kan også benyttes for globale krefter og momenter [24]. Bølgene som blir tatt i bruk er som oftest laget av et bølgespektrum som blir produsert gjennom modelltester og numerisk programvarer [28]. RAO definerer forholdet mellom inngangs- og utgangsdata og i frekvensdomenet og kan skrives som  $|H(\omega)|^2 = \frac{S_{yy}(\omega)}{S_{xx}(\omega)}$  [12]. Ligningen kan omformuleres og skrives som Ligning 11.

$$H(\omega) = \sqrt{\frac{S_{yy}}{S_{xx}}} . \quad (11)$$

Der  $H(\omega)$  er RAO-spekteret,  $S_{yy}$  er responspekteret og  $S_{xx}$  er bølgespekteret.  $S_{yy}$  blir målt med et bevegelseskamerasystem og  $S_{xx}$  fra bølgehøydemålere i MarinLab.

## 2.5 Dynamisk respons

En flytende modell som benytter et forankringssystem for å holde seg i korrekt posisjon, vil oppleve krefter og bevegelser når den blir utsatt for laster. Lastene kan deles opp i to deler, der den ene delen er statisk og den andre delen er dynamisk [17]. De lastene som vil bli tatt hensyn til i denne oppgaven er de dynamiske lastene. Belastningene som er dynamiske oppstår fra bølger og vind. Resultatet av bølgebelastningene til et system er det en kan kalle dynamisk respons. Den dynamiske responsen vil ha en tilkobling til den totale responsen og bevegelsen av konstruksjonen og blir satt sammen av differensialligninger [17].

Det kan bli utført forenklinger på ligninger og oppsett for å kunne se helheten bedre. Da kan oppsettet bli sett på som et system med en enkel frihetsgrad. Egenskapene og bevegelsen til konstruksjonen vil bli bedre observert og dermed kan beregninger bli enklere satt opp.

Et system vil som regel aldri være dempningsfritt, selv om dempningen er så liten at den ikke har så stor betydning for resultatene [17]. Hvis en skal se bort ifra dempning for å finne den udedempede egenfrekvensen,  $\omega_n$  til et teoretisk system, kan Ligning 12 bli benyttet

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (12)$$

der  $k$  er fjærkonstanten og  $m$  er systemets masse [17]. Denne ligningen er viktig for å forstå den udedempede egenfrekvensen til modellen. Dersom modellen blir påvirket av en kraft og blir forskjøvet fra sin likevektsposisjon og dermed frigjøres, vil den gjennomgå en harmonisk svingning. En forsterkning av denne bevegelsen kan oppstå, hvis perioden sammenfaller med den naturlige perioden i systemet [17].

Som nevnt i 2.1 kan et flytende legeme ha seks frihetsgrader. Disse seks frihetsgradene er i den form, at de enkelte ganger kan være uavhengige bevegelser. En viktig parameter som bestemmer om et system er påvirket av flere frihetsgrader er fortøyningslinene, om de er slakke eller stramme. Hvis fortøyningslinene er slakke, vil systemet være fritt til å bevege seg i alle de seks frihetsgradene. Om fortøyningslinene er stram, kan frihetsgradene bevege seg i begrensede retninger [17].

Newtons 2. lov tar utgangspunkt i hvordan ligningen for fri, dempet svingning starter [22], og er gitt som:

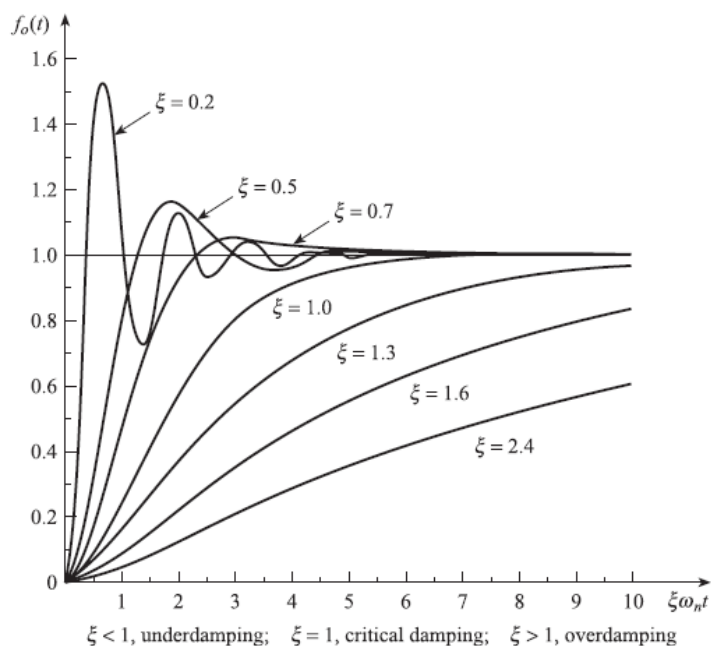
$$\sum F = m\ddot{\eta} , \quad (13)$$

ved å snu om ligningen vil venstre side bestå av systemets indre mottak. Dette består av tilleggsmasse, masse, dempningskraft og fjærkraft. På høyre side av ligningen vil de ytre kreftene som også kalles påførte laster dominere. De påførte lastene kan være vind eller bølger [22]. Krefter fra bølger er et eksempel på det som kalles eksitasjonskraft. I Ligning 14 blir det illustrert en likevekt som illustrerer en fri, dempet svingning [22] :

$$(M + A)\ddot{\eta} + B\dot{\eta} + C\eta = F , \quad (14)$$

der  $M$  masse,  $A$  er tilleggsmassen,  $B$  er dempningskraften,  $C$  er fjærkoeffisienten og  $F(t)$  er eksitasjonskraften, og de er i matrisform [22]. Eksempelvis er  $M_{11}$  massematrisen til frihetsgraden  $\eta$ .  $\ddot{\eta}$  er akselerasjonen,  $\dot{\eta}$  er hastighet og  $\eta$  er posisjon. Kombinasjonen av matrisene og vertikalposisjonene gir dermed at  $M\ddot{\eta}$  er treghetskraften,  $B\dot{\eta}$  er dempningskraften og  $C\eta$  er fjærkraften [22]. Tilleggsmassen  $A$  er betegnelsen på en tilført masse og en treghetseffekt på grunn av den akselererte massen til den omkringliggende væsken [29]. Tilleggsmassen adderes inn i massematrisen. I denne oppgaven er det ikke fokusert å analysere tilleggsmasse eksperimentelt.

Mengden av dempning har ulike tilstander og de ulike tilstandene er avhengig av dempningsfaktoren. Tilstandene til dempningen deles inn i tre deler, der verdien på dempningsfaktoren avgjør om hvor høy eller lav dempningen i systemet er. Fra Figur 10 blir det illustrert de ulike tilstandene for dempning og hvordan de forholder seg til hverandre. Dempningstilstanden blir beskrevet som  $\zeta$ . Hvis tilstanden beskrives som  $\zeta > 1$ , er dempningstilstanden overdempet. Et overdempet system har en ikke-oscillerende bevegelse. Det samme gjelder for tilstanden kristisk dempet og skrives som  $\zeta = 1$  [17] . Den siste tilstanden er underdempet og skrives som  $\zeta < 1$ . Denne dempningstilstanden sier at svingningen vil bli mindre og mindre inntil likevekten er nådd [30].



Figur 10: Illustrasjon av de ulike tilstandene av dempning [31].

### 2.5.1 Decay-test

En konstruksjon som befinner seg i et åpent hav, vil bli påvirket av ytre faktorer. Hvor disse ytre faktorene treffer konstruksjonen vil ha noe å si for frihetsgradene, til systemet. De ulike bevegelsene som inntreffer i de ulike frihetsgradene, er med på å bestemme egenfrekvens og dempningen til systemet. Egenfrekvens er når systemet får sin egen svingning etter å ha blitt påført en bevegelse i en retning. En hensikt med en decay-test er å kunne finne ut hvordan konstruksjonen beveger seg i de ulike frihetsgradene, og hvordan perioden mellom hver svingning korresponderer med systemets egenfrekvens. Raten som svingningen avtar med, er systemets dempningsrate [17]. I MarinLab måles dempet egenfrekvens, der formelen er illustrert i Ligning 15 [17].

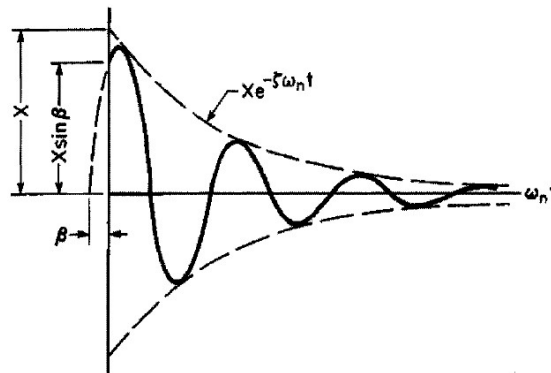
$$\omega_d = \omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2} . \quad (15)$$



Der  $\omega_0$  er den naturlige udedempede egenfrekvensen som også kan skrives som  $\omega_n$  og  $\zeta$  er dempningskoeffisienten [17]. Svingningene som oppstår etter bevegelsen i en decay-test er udedempede sinusbølger. Et udedempet system er når  $\zeta < 1$ , som beskrives i kapittel 2.5. I et underdempet system kan forskyvningen av systemet  $x$  formuleres som Ligning 16 [17].

$$x = X \exp(-\zeta\omega_n t) \sin[\sqrt{1 - \zeta^2}\omega_n t + \beta] . \quad (16)$$

Der  $X$  er forskyvningsamplituden,  $\beta$  er fasevinkelen og  $t$  er tiden etter at systemet er satt i bevegelse [17]. Hvis  $\omega_n$  og  $\zeta$  får en høyere verdi, så vil systemet få en hurtigere dempning. Figur 11 viser til Ligning 16 som illustrasjonen, der den viser en nedgående svingning av et lineært dempet system.



Figur 11: En kurve som har en nedgående svingning av et lineært dempet system [17].

## 2.6 Forskrift om krav til flytende oppdrettsanlegg, NS9415

Standarden NS9415 omhandler flytende akvakulturanlegg, lokalitetsundersøkelser og prosjektering. Dokumentet er utarbeidet av komité SN/K 509 Flytende akvakulturanlegg med mange medlemmer innenfor havbruksnæringen. Målet med et slikt dokument er krav til flytende akvakulturanlegg med hensikt å forebygge rømning som kan forekomme av svikt i det tekniske eller ulike driftsoppgaver som utføres på anleggene. I dokumentet står det også om grunnleggende krav til prosjektering og utførelse, som er alt fra risikovurdering, konstruksjonsberegninger og modellforsøk. Materialer er også et viktig tema i dokumentet med tanke på korrosjon og materialeegenskaper.

Et av de relevante kapitlene i dokumentet er 9.1.6.3 og omhandler brudd i forankringen. Kapittelet forteller at det skal påvises kapasitet for ulike typer brudd, og dette er signifikant for å vite hva som skal bli tatt hensyn til under oppsettet av forankringssystemet. I kapittel 9.4.5.2 som forteller om egenperioder, er egenperioder det sentrale temaet og er viktig for frihetsgradene jagg, gir og svai. De ulike frihetsgradene er viktig å dokumentere og observere i forhold til konstruksjonen sin bevegelse. Kapittel 13 som beskriver kravene til forankring og posisjonering, gir nyttig bakgrunnskunnskap, og kan bidra til økt forståelse av et forankringssystem.

## 2.7 Sloshing

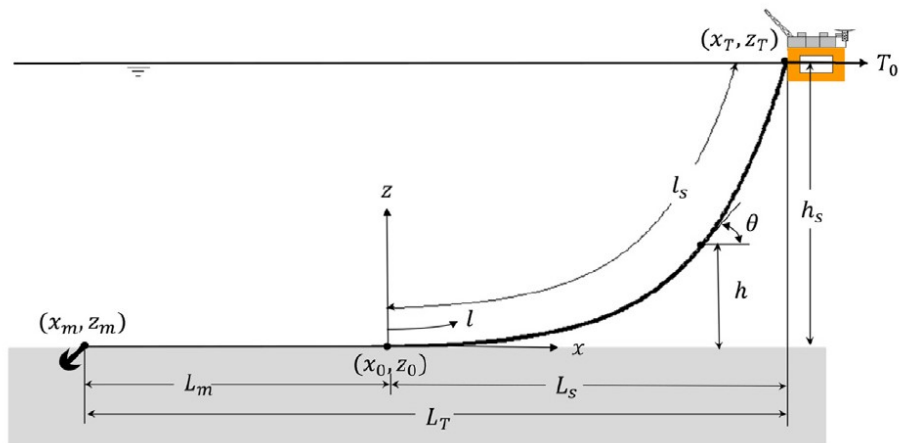
Benevnelsen sloshing er krefter som er generert av store væskebevegelser eller bølgebevegelser som befinner seg i en lukket beholder eller tank som inneholder vannvolum med fri væskeoverflate som skvulper [32]. For Egget<sup>®</sup> som er et flytende lukket oppdrettsfasilitet i sjø, vil den bli påvirket av bølger på utsiden og dette vil påvirke væsken på innsiden. Geometrien til Egget<sup>®</sup> vil være med å påvirke hvordan væsken på innsiden oppfører seg. Formen på Egget<sup>®</sup> var gitt i denne oppgaven, og i forhold til sloshing, så baserer oppgaven seg på et forsøk der Egget<sup>®</sup> ble påført et lokk og uten lokk.

## 2.8 Forankringsteori

Hensikten bak forankring er å holde anlegget i en passende posisjon slik at den ikke gir for store forstyrrelser til de aktuelle og omkringliggende komponentene. Dette kan være alt fra forankringsliner til kjetting og ankeret. Fortøyning er et begrep som sier at komponentene til anlegget er satt sammen ved havoverflaten ved for eksempel en rammefortøyning. Forankring er festet i havbunnen ved for eksempel et anker. Fortøyningen vil gå fra anlegget ned gjennom tauene til ankeret i bunnen av havet.

### 2.8.1 Linekarakteristikk

Forankringen må tåle å holde anlegget på plass, og fortøyningen må være kraftig nok til å motstå kombinasjoner av bølger, vind og strøm. Det skal også tas hensyn til at fisken ikke har for store påkjenninger ved at anlegget beveger seg. For å forklare kreftene til et forankrings-system er det viktig å ta med de punktene i forankringslinen som er mest utsatt. Illustrasjon av linekarakteristikken med hensyn på krefter vises i Figur 12.

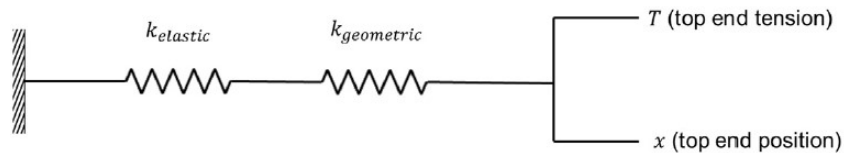


Figur 12: Illustrasjon av linekarakteristikken med horisontale krefter [33] .

Her er  $T_0$  er den horisontale kraften,  $h_s$  er dybden til innfestningen,  $l_s$  er aktiv linelengde og  $L_T$  er avstanden fra ankeret til enden på linen.

## 2.8.2 Fortøyningsstivhet

Tauet i fortøyningssystemet utøver en viss horisontal og vertikal kraft. Desto større forskyvningen til konstruksjonen er fra dens likevektsposisjon, jo større er selve reaksjonskraften til  $T_0$ . Dette kan sammenlignes med fortøyningsstivheten i den form av at det er en reaksjonskraft i et enkelt fjærsystem. Fortøyningsstivhet vil gi et proporsjonalt forhold mellom forskyvning og kraft [33]. Fortøyningsstivheten blir delt opp i to stivheter, den ene er elastisk stivhet og den andre er geometrisk stivhet. Dette blir illustrert i Figur 13.



Figur 13: Illustrasjon av fortøyningsstivheten i form av den elastiske- og geometriske stivheten [33].

I denne oppgaven brukes bare den elastiske stivheten, og dette på grunn av at den geometriske stivheten blir neglisjert. For å finne den elastiske stivheten til fjæren som skal gi dempning til konstruksjonen sammen med fortøyningsslinen, blir Ligning 17 benyttet [34].

$$k = \frac{F}{L}, \quad (17)$$

der  $k$  er fjærkonstanten,  $F$  er påført kraft og  $L$  er den totale lengden på den elastiske komponenten, som kan være tau eller kjetting.

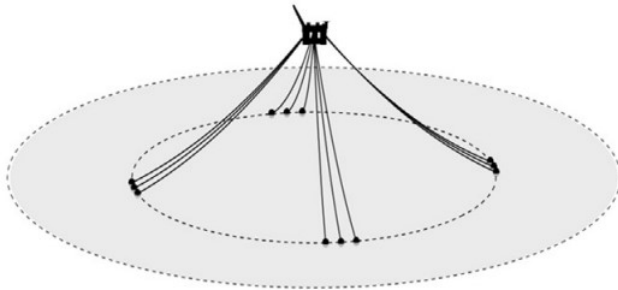
## 2.9 Forankringsoppsett

Det finnes ulike typer forankringsformer og noen av disse vil bli gått igjennom i dette kapitlet. De to forankringstypene som blir forklart i dette kapitlet skal bli tatt videre for eksperimentelle analyser.

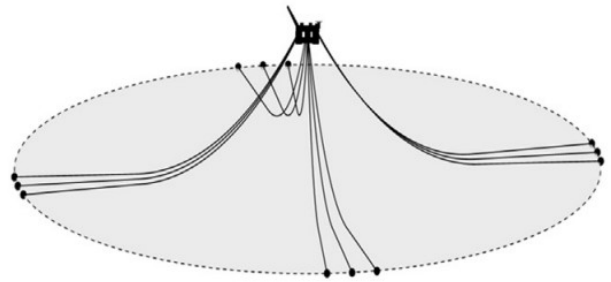
### 2.9.1 Stramline- og slakkline forankring

Stramline forankringen har stramme liner som går fra bunnfestet og opp til anlegget. Ved grunt vann kan dette systemet oppleve for stor linestivhet og vil dermed passe bedre til større dyp [33]. Stramline forankring vil ha en gjenopprettings kraft, som er et resultat av aksial strekk og omfatter syntetiske tau [35]. Fra Figur 14 blir det illustrert en stramline forankring.

Slakkline forankringen er oppbygd ved at en slakk line går fra innfestningspunktet til anlegget, og ligger delvis horisontalt på havbunnen. I Figur 15 blir dette illustrert. Slakkline forankring er det systemet som er ofte brukt i offshore virksomheten og passer alt fra grunt til middels dypt vann [33]. Oppbyggingen til dette system består av kjetting på nederste del av linen, ved ankerfestet. Dette på grunn av at tauene ikke skal komme i kontakt med havbunnen. Over tid kan det oppstå friksjon, og kan skape slitasje [35].



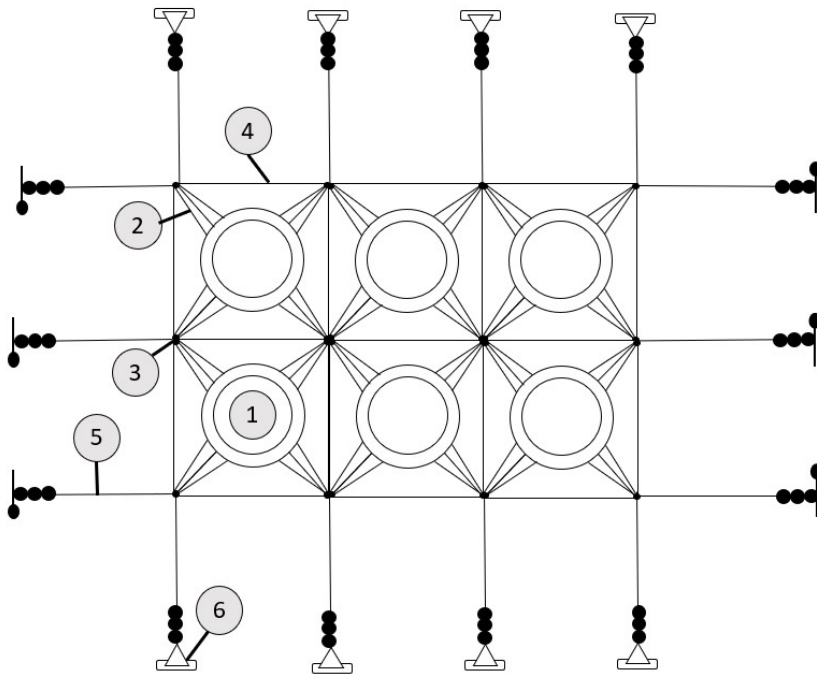
Figur 14: Illustrasjon av en stramline forankring [33].



Figur 15: Illustrasjon av en slakkline forankring [33].

## 2.9.2 Rammefortøyning

Dette oppsettet er bygd opp som en ramme ved vannoverflaten. Oppsettet er med på å holde en sikker avstand fra merd til merd og samtidig være koblet til et sammenhengende system [36]. En illustrasjon av en rammefortøyning blir vist i Figur 16, der nummeringen av de ulike parameterne forklares i Tabell 2. Bunnfestet som kan bestå av anker eller fjellbolt blir plassert på havbunnen og monteres i ankerkjettingen. Videre derfra monteres ankerkjettingen til en kause som er festet til forankringstauet. Deretter festes tauet til koblingsringen. For å få oppdrift til rammefortøyningen anbefales det å montere oppdriftsbøyer [37].



Figur 16: Illustrasjon av en rammefortøyning med nummerering, inspirert fra kilde [38].

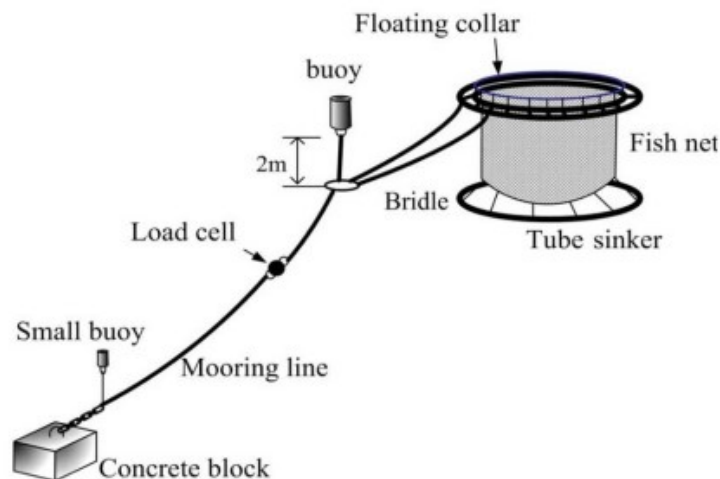
Tabell 2: Parameterne til rammefortøyningene.

Nummer	Parameter
1	Flytekrage
2	Hanefot
3	Koblingsplate
4	Rammetau
5	Fortøyningsline
6	Bunnfeste

### 2.9.3 Ettpunktsforankring

Ettpunktsforankring, også kalt (SPM) står for singel point mooring, og er festet til bunnen ved enten betonglodd (concrete block), anker eller fjellbolt. Fra bunnfestet blir det festet en kjetting som går videre til forankringstauet. På noen anlegg finnes det en liten oppdriftsbøye nede ved kjettingen. Dette er for å forminske sannsynligheten for friksjon mellom kjetting og havbunnen. Dette blir illustrert i Figur 17. Videre kan det tilføres en lastcelle på forankringslinen for å kunne måle kreftene på linen. Deretter blir linen koblet til en koblingsplate og går videre til en oppdriftsbøye og selve merden.

Hovedprinsippet med denne typen forankring er at oppsettet bare skal være forankret til et punkt på havbunnen. Fordelen med et slik forankringsoppsett for et åpent merd system er at det kan ha en betydelig reduksjon av at det samler seg bunnslam på en plass. En annen fordel er reduksjon i forankringskostnader per merd [39]. Forskjellen mellom et ettpunktsforankring og slakkline forankring er at forankringsoppsett med slakkline vil få store belastninger av ytre faktorer siden anlegget står statisk fast på et sted. De store belastningene kan påføre slitasje og store forskyvninger på forankringssystemet. Ettpunktsforankringen vil dermed kunne flytte seg fritt slik at det kan redusere de mest inngripende miljøpåvirkningene som kan oppstå [17].



Figur 17: Illustrasjon av et ettpunktsforankring med de ulike parameterne [40].

## 2.9.4 Hovedbestanddelene i et forankringssystem

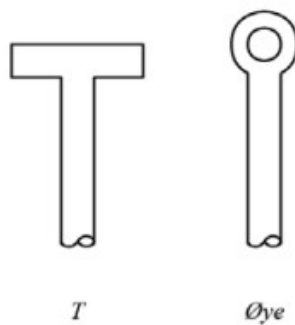
### Bunnfeste

For at et oppdrettsanlegg skal holde seg på en plass og ikke drifte av gårde, må forankringen bli festet til havbunnen. Dette gjøres som regel ved anker eller en fjellbolt, og blir montert i selve ankerkjettingen. Valg av type anker er viktig for å få den korrekte funksjonen som ankeret skal gjøre for et oppdrettsanlegg. Ankeret som blir ofte brukt i havbruksnæringen er ploganker og passer for sandbunn og blandingsbunn. Konstruksjonen til en ploganker er designet for å tåle belastningene som kan komme av ytre krefter [41]. Figur 18 illustrerer en ploganker.



Figur 18: Illustrasjon av en ploganker [42].

En annen type bunnfeste kan være en fjellbolt, og de blir forankret til en fjellbunn. Innenfor fjellbolter finnes det ulike typer med ulike hensikter, men de viktigste hensiktene omhandler å unngå rømning og havari. For forankring brukes ofte T-bolt og øyebolt [43]. I Figur 19 vises en T-bolt og øyebolt som begge er fjellbolter som brukes innenfor havbruk.

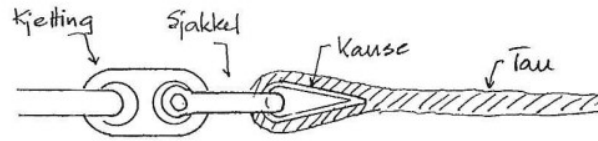


Figur 19: Illustrasjon av de to ulike fjellboltene, T-bolt og øyebolt [43].



## Forankringsfeste ved bunnen

Etter bunnfestet kommer festningen som går fra ankeret til fortøyningslinen. Fra bunnfeste går kjettingen videre til en sjakkkel. Dermed går sjakkelen til kausen, og videre til fortøyningslinen. Denne festningen blir illustrert i Figur 20.

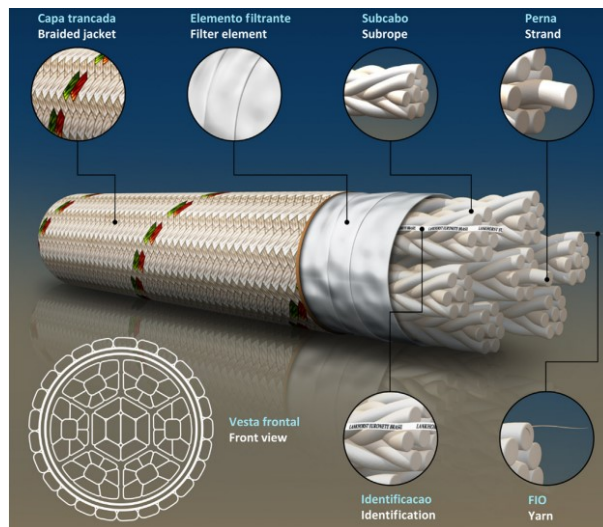


Figur 20: Illustrasjon av et forankringsfeste som går fra bunnfeste til fortøyningslinen [44].

Kjettingen som blir benyttet til forankringen burde ha en tung kjetting, rundt (25-30 mm). Dette er viktig for å unngå fjæringseffekten i systemet. Det kan utløse de vertikale kreftene, som kan påvirke ankeret. En tung kjetting er også viktig for å unngå friksjon mellom havbunn og kjetting som kan føre til gnaging på tauet. Kjettingen er også viktig med tanke på å justere forspenningen til systemet [44].

## Fortøyningstau

Det er viktig å ha riktig type fortøyningstau med tanke på slitasje på forankringen. Belastningen på tauet kan påvirke hele forankringssystemet og det er dermed viktig at det er riktig materiale som benyttes. Fibertau er et tau som ofte blir brukt i forankringssystemer og har den fordelen at den er nesten vektløs i vann, og har større elastisitet enn andre fortøyningstau [44]. Fra Figur 21 blir det illustrert hvordan et fortøyningstau kan se ut innenfra.



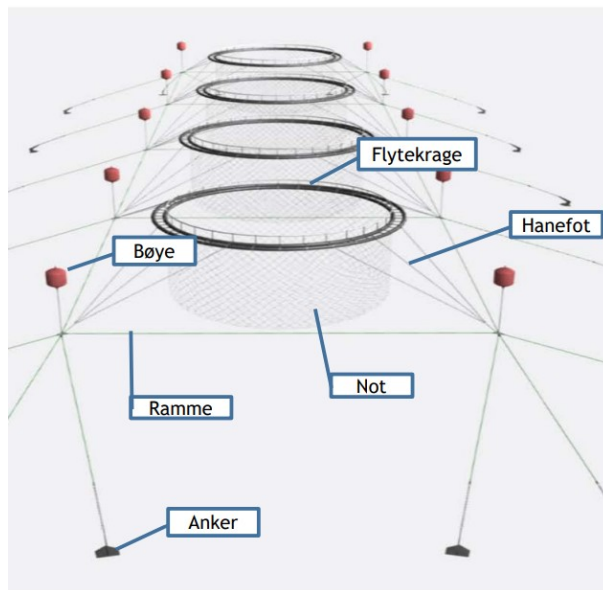
Figur 21: Illustrasjon av et fortøyningstau som blir brukt i oppdrettsnæringen [33].

Det finnes ulike former for fibertau og de mest brukte i oppdrettsnæringen er 3-slått PP og PE. Den andre typen er 8-slått av PP og PE [45]. Et viktig materiale i fibertau er polyester. Tauene som inneholder polyester, kan unngå tretthet, noe som kan føre til slitasje på tauet [33].

### Fortøyningsfeste ved overflaten

Videre skal fortøyningslinene gå til en koblingsplate som skal koble tauene sammen på en sikker måte. Koblingspunktet skal være et samlepunkt for fortøyningslinen som kommer fra bunnfestet, og tauet fra en eventuell oppdriftsbøye og tauet fra selve oppdrettsanlegget.

En hanefot er en fortøyningsline som er med på å holde rammefortøyningen til flytekragen. Det vanlige er at det går to til tre haneføtter ut fra rammefortøyningshjørne til flytekragen. I Figur 22 blir fortøyningsparametere presentert.



Figur 22: Illustrasjon av fortøyningsparameterne [46].

## 3 Metode

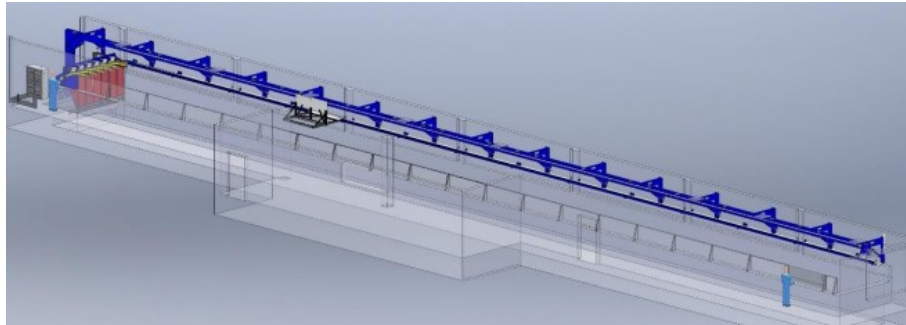
I dette kapitlet vil fremgangsmåten til masteroppgaven bli presentert. Metodekapitlet er delt opp i fire deler. I den første delen presenteres det eksperimentelle oppsettet på MarinLab i en helhetlig oversikt. Det starter med forklaring av MarinLab og Egget<sup>®</sup>, bølgehøydemåler og til slutt det optiske kamerasystemet. Den andre delen begir seg ut på de eksperimentelle oppsettene, der rammefortøyningen og ettpunktsforankringen blir presentert. Den tredje inndelingen er de eksperimentelle fremgangsmåtene, og omhandler krengeprøven, decay-testene, regulære- og irregulære bølgetestene, oppdriftsbøyen og lastcellene. Den siste delen går inn på databehandlingen som ble utført og resultatene ble analysert i MATLAB [10]. Programmet MATLAB er en programmerings- og numerisk databehandlingsplattform, som brukes for å analysere data. Den har skript, der en kan kombinere koder og formatere tekst [47].

### 3.1 Eksperimentelt oppsett

Denne masteroppgaven tar for seg en eksperimentell metode som ble utført i MarinLab ved Høgskulen på Vestlandet. Utstyr og instrumenter som ble benyttet under forsøkene blir presentert i dette kapitlet. For videre beregninger er det oppgitt en skaleringsfaktor på 21.5 ved bruk av Ligning 1. Skaleringsfaktoren ble anvendt for å kunne skalere fra fullskala modell som ble brukt til numeriske verdier fra den parallelle masteroppgaven [7]. Disse verdiene er skalert ned til modellskala for å kunne bli benyttet til de eksperimentelle forsøkene.

### 3.1.1 MarinLab

Den eksperimentelle delen av masteroppgaven ble testet i MarinLab som er en hydrodynamisk fasilitet, som inneholder en bølgetank. I den ene enden har bølgetanken en bølgegenerator som består av seks klaffer. De seks klaffene er til for å absorbere bratte bølgevinkler. I den andre enden er det en strand som vil absorbere de kommende bølgene. Tanken inneholder også slepevogn, rigg og kamerasystem som posisjonerer objektet som testes. Bølgetanken har en vogn som har en hastighet på 5 m/s og 1.2 m/s<sup>2</sup> akselerasjon. Tanken er 50 meter lang, 3 meter bredt og har en dybde på 2.2 meter. Den maksimale bølgehøyden er 0.5 meter. Hensikten med en slik bølgetank er for å teste ulike bølger i forhold til ulike modeller [48]. I Figur 23 blir bølgetankens utforming illustrert.



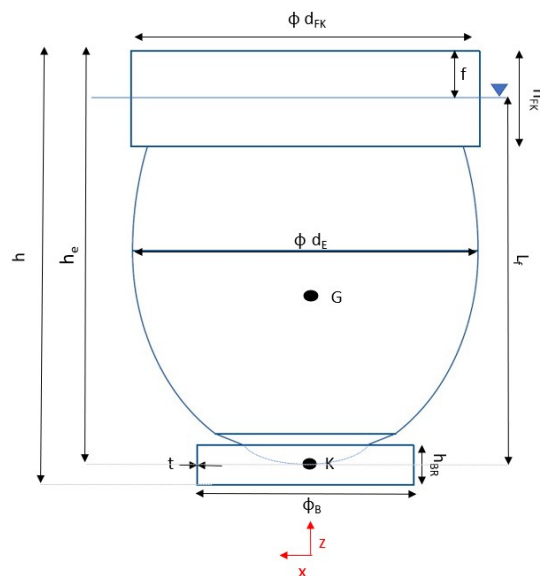
Figur 23: Illustrasjon av bølgetanken i MarinLab [49].

### 3.1.2 Modell av Egget<sup>®</sup>

Modellen som ble brukt i denne masteroppgaven er Egget<sup>®</sup>, og er en modell som ble laget våren 2021 av bachelor-studenter på Høgskulen på Vestlandet [9]. Egget<sup>®</sup> har videre blitt utformet og endret på til dette prosjektet. I Figur 24 blir det illustrert en skisse av Egget<sup>®</sup>. I skissen blir de geometriske- og de hydrostatiske egenskapene til Egget<sup>®</sup> illustrert. I Tabell 3 blir de fysiske størrelsene og verdier til Egget<sup>®</sup> presentert.

Fribordet ( $f$ ) ble gitt som en meter i fullskala, som ble skalert ned til 0.046 m i modellskala. Det ble deretter tegnet en strek på Egget<sup>®</sup> for å skissere hvor fribordet skulle være og hvor mye Egget<sup>®</sup> måtte ballasteres. Videre ble vektlodd lagt til Egget<sup>®</sup> inntil det nådde det skisserte fribordet. Ballasteringen ble derfra 8.2 kg, og skisse av plasseringen til vektloddene blir illustrert i Figur 26 i 3.1.4.

Fremgangsmåten for å finne volumdeplasementet var å ta den totale vekten av Egget<sup>®</sup> med ballast og addere med det totale oppdrettsvolumet som Egget<sup>®</sup> rommer. Den totale vekten med ballast er 34.4 kg og oppdrettsvolumet i fullskala er på 1850 m<sup>3</sup> [50]. I modellskala ble oppdrettsvolumet på 0.19 m<sup>3</sup> og den verdien multipliseres med tettheten til vannet ( $\rho$ ) som er estimert til 1000 kg/m<sup>3</sup>. Da ble oppdrettsvolumet til modellen 190 kg. Ut ifra dette ble volumdeplasementet ( $\nabla$ ) 224.4 kg. For å kunne beregne massedeplasementet ( $\Delta$ ) ble massen til Egget<sup>®</sup> addert med volumdeplasementet som ble 258.8 kg. Resten av verdiene til Egget<sup>®</sup> er målt og beregnet på MarinLab.



Figur 24: Skisse av modellen til Egget<sup>®</sup> som blir brukt under testingen på MarinLab.

I Tabell 3 blir det presentert de fysiske størrelsene, symbolene og verdiene til Egget<sup>®</sup> som blir illustrert i Figur 24.

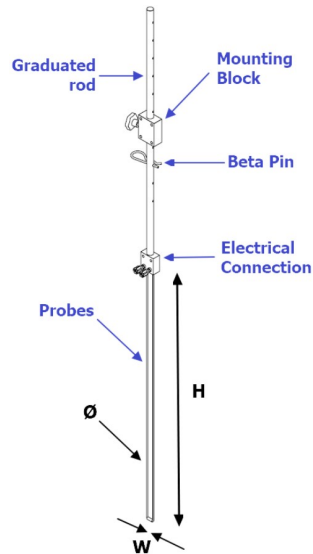
Tabell 3: Mål og egenskapene til Egget<sup>®</sup> i modellskala.

Fysisk størrelse	Symbol	Verdi
Total høyde, modell	$h$	0.889 m
Høyde, Egget <sup>®</sup>	$h_e$	0.843 m
Diameter, Egget <sup>®</sup>	$\Phi d_E$	0.700 m
Fribord til bunnen	$L_f$	0.806 m
Fribord	$f$	0.046 m
Diameter, flytekrage	$\Phi d_{FK}$	0.719 m
Høyde, flytekrage	$h_{FK}$	0.192 m
Høyde, bunnring	$h_{BR}$	0.082 m
Diameter, bunnring	$\Phi_B$	0.440 m
Tykkelse, bunnring	$t$	0.030 m
Modellvekt	-	26.2 kg
Ballast	-	8.2 kg
Volumdeplasement	$\nabla$	224.4 kg
Massedepasement	$\Delta$	258.8 kg
Tyngepunktet fra kjøll	$KG$	0.444 m

### 3.1.3 Bølgehøydemåler

Prinsippet bak en bølgehøydemåler er å registrere de innkommende bølgene som ble formet i bølgeprogrammet. Bølgehøydemåleren besto av en stang med hull som gikk igjennom en blokk som hadde en elektrisk forbindelse. Fra blokken var det festet en lang node ned i vannet, som hadde to parallelle stenger. Motstanden mellom stengene var proporsjonal med nedsenkningsdybden [51]. En bølgehøydemåler er resistansbasert og må kalibreres før bruk. For å kalibrere en bølgehøydemåler ble programmet Njord Wave Synthesiser av Edinburgh Design benyttet [52]. Programmet ga en stegvis beskrivelse av utførelsen og gikk ut på å flytte stangen opp og ned i vannet ved en gitt avstand [51].

I begge eksperimentene var det satt opp tre bølgehøydemålere, og i Figur 27 og 30 blir det illustrert hvor i tanken disse målerne var satt opp. Det er også viktig å merke seg at samplingsfrekvensen til bølgehøydemålerne er 128 Hz. I databehandlings kapittelet 3.4.2 ble det bestemt en bølgehøydemåler som ble benyttet i alle MATLAB-skriptene, som ga det beste grunnlaget for videre resultater. Figur 25 illustrerer hvordan en bølgehøydemåler ser ut.

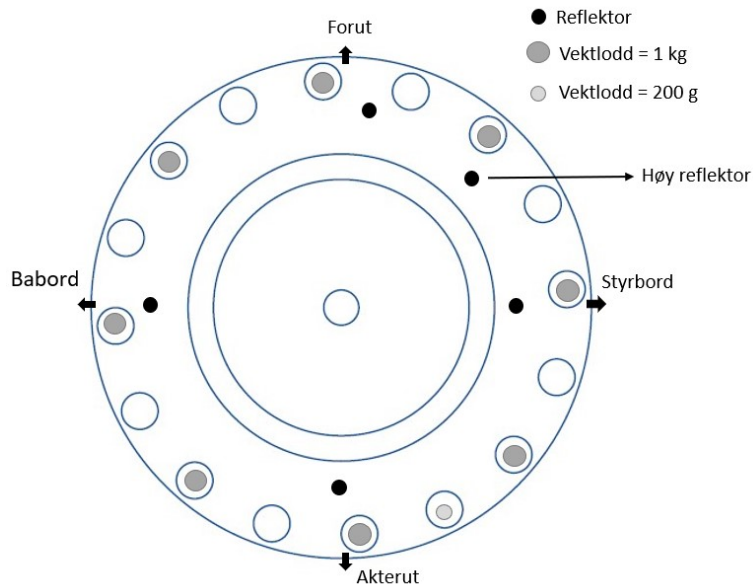


Figur 25: Bølgehøydemåleren som ble brukt i bølgetanken [51].



### 3.1.4 Optisk kamerasystem

Kamerasystemet som ble brukt i MarinLab for å registrere bevegelse og posisjon til objektet som ble testet, het Qualisys Track Manager (QTM) [53]. Denne typen kamerasystem bruker Eulers vinkler, som betyr at objektes plassering er definert ved å ta hensyn til et globalt koordinatsystem, der samplingsfrekvensen er 100 Hz [53]. For at bevegelsen til Egget<sup>®</sup> skulle kunne bli observert av kameraene, måtte reflektorer bli plassert på modellen som skulle benyttes. En viktig faktor var å plassere reflektorene på en slik måte at kameraene fanget disse opp. I Figur 26 blir det illustrert reflektorenes- og vektloddenes plassering på Egget<sup>®</sup>.



Figur 26: Skisse av flytekragen til Egget<sup>®</sup> sett ovenfra med reflektor- og vektlodd plassering.

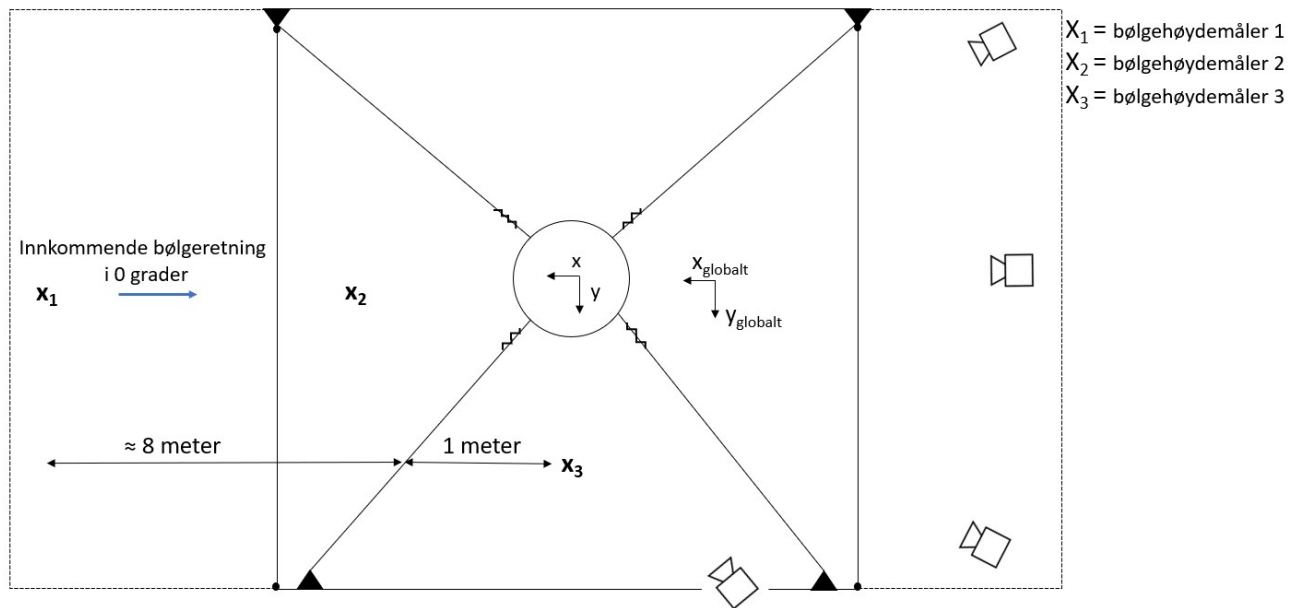
For å kunne få programmet Qualisys til å få opp reflektorene til modellen var det viktig å lage en rigid body, som kalles et stivt legeme på norsk. Et slikt stivt legeme vil spore og definere hvor modellen med markører ligger i forhold til koordinatsystemet, som kalles motion capture. Dette er noe som måtte justeres på i forhold til hvor modellen lå i tanken. De seks frihetsgradene er de som utgjør det stive legemet [54].

## 3.2 Eksperimentelt oppsett

I denne delen av metodekapittelet blir test-oppsettene i MarinLab illustrert for rammefortøyningen og ettpunktsforankringen.

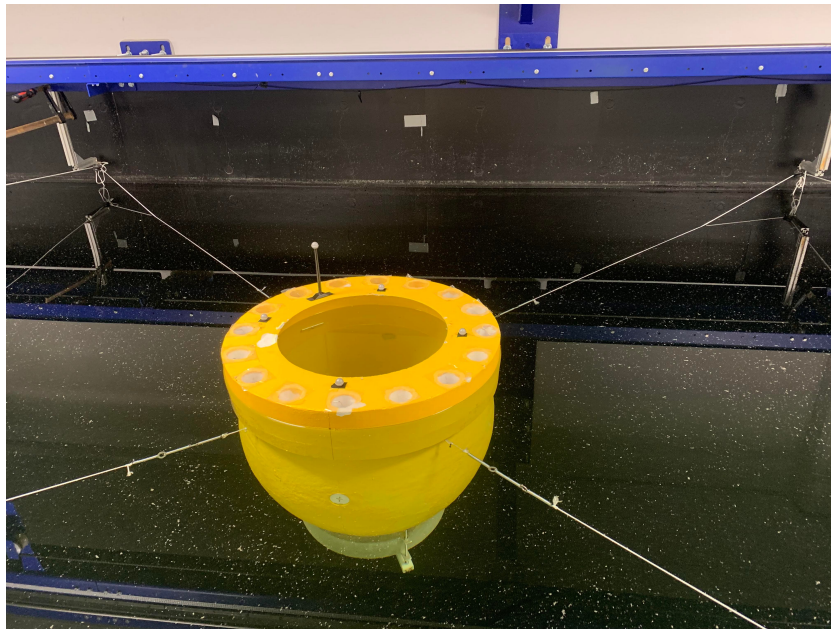
### 3.2.1 Rammefortøyning

Det første oppsettet er rammefortøyning, og i Figur 27 blir skissen til rammefortøyningen, plasseringen til bølgehøydemålerne og kameraene illustrert. Oppsettet ble satt opp med fire fortøyningslinjer, der de var festet til Egget<sup>®</sup> ved en fjær på hver line. På den ene siden av tanken ble to av linene festet med en skrutvinge, metall armer og vaiere. På den andre siden av tanken ble to sugekopper festet for å ha en ekvivalent fortøyningshøyde. Fjærene ble montert så nært modellen som mulig, 16 cm fra innfestet. Hensikten med å montere fjærene nært modellen var for å kunne dempe eventuelle krefter fra modellen til tauet.



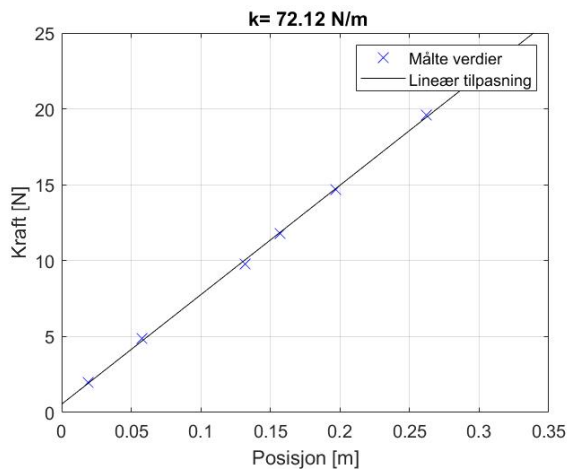
Figur 27: Skisse av rammefortøyningen til Egget<sup>®</sup> med plassering av bølgehøydemålere og kamera.

Før modellen ble plassert i tanken ble det målt opp distanser i forhold til kamera og bølgehøydemålere. I Figur 28 blir det illustrert hvordan oppsettet til rammefortøyningen så ut.



Figur 28: En illustrasjon av rammefortøyningen til Egget<sup>®</sup> i bølgetanken.

Før rammefortøyningen kunne bli satt opp, måtte stivheten til systemet bli regnet ut. Måten dette ble utført på var å finne passende fjærer for rammefortøyningen. Ved å bruke Ligning 17, som illustrert i 2.8.2, som er  $k = \frac{F}{\Delta L}$ , så kunne fjærkonstanten  $k$  finnes [34]. Det ble testet tre forskjellige fjærer med fem forskjellige vektstørrelser. I Tabell 4 blir det presentert kraft ( $F$ ) i newton, og denne verdien kommer fra vekten av loddet som ble påført og multiplisert med akselerasjonen som er på  $9.81 \text{ m/s}^2$ . Posisjonen (m) er den totale lengden på fjæren etter den hadde blitt forlenget ved påføringen av loddet. Den elastiske stivheten [N/m] var resultatet fra disse verdiene med bruk av Ligning 17. I Figur 29 blir posisjonen i forhold til kraften illustrert med en lineær tilpasning for de målte verdiene. Dette ble utført for å finne stigningstallet.



Tabell 4: Målt stivhet til fjæren til rammefortøyningen.

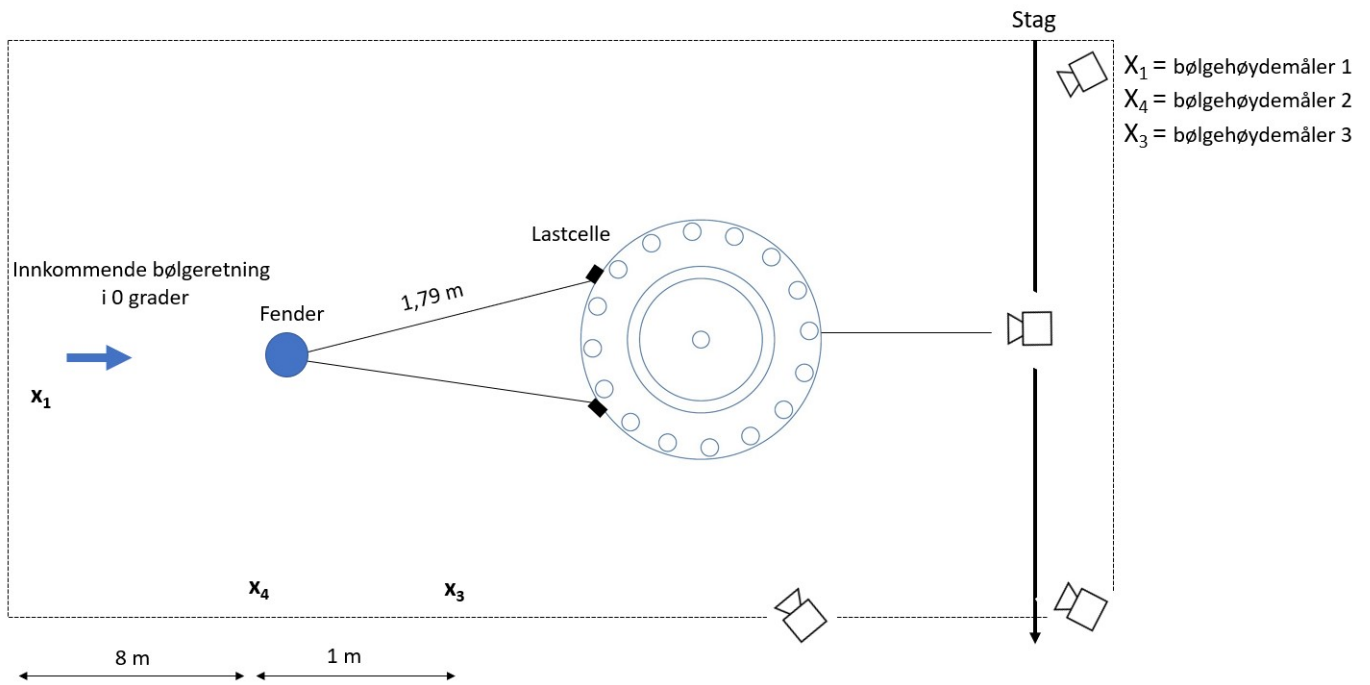
Kraft [N]	Posisjon [m]	Elastiske stivheten [N/m]
1.96	0.019	103.26
4.90	0.058	84.56
9.81	0.132	74.31
11.77	0.157	74.90
14.72	0.197	74.69
19.62	0.262	74.80

Figur 29: Stigningstallet for stivheten til fjæren som er benyttet for å teste ut stivheten til rammefortøyningen.

Etter testingen av den elastiske stivheten til fjæroppsettet, og at verdiene ble fraktet til MATLAB-skriptet med en polyfit-funksjon, ble resultatet at en fjær hadde en elastisk stivhet på gjennomsnittlig 72.12 N/m. Dette vil da være stivheten til systemet. Observasjonene fra Tabell 4 viser at fjærene ikke er lineære i starten, ved en stivhet på 103.26 N/m. Etter hvert så vil fjærene stabiliserer seg, på rundt 74 N/m. Det ble forsøkt og ikke operere rundt den ikke lineære tilstanden, men dette var noe som var vanskelig å opprettholde. Å holde fjærene stive under hele forsøket ble utført med å stramme opp fortøyningslinene. Under de irregulære bølgene ble det observert at fjærene ikke var like i strekk som de hadde blitt satt i utgangspunktet. Grunnen til dette kunne kommet av en geometrisk deformasjon av fjærene, som ble observert etter testene. Dette kan ha en påvirkning på sluttresultatene.

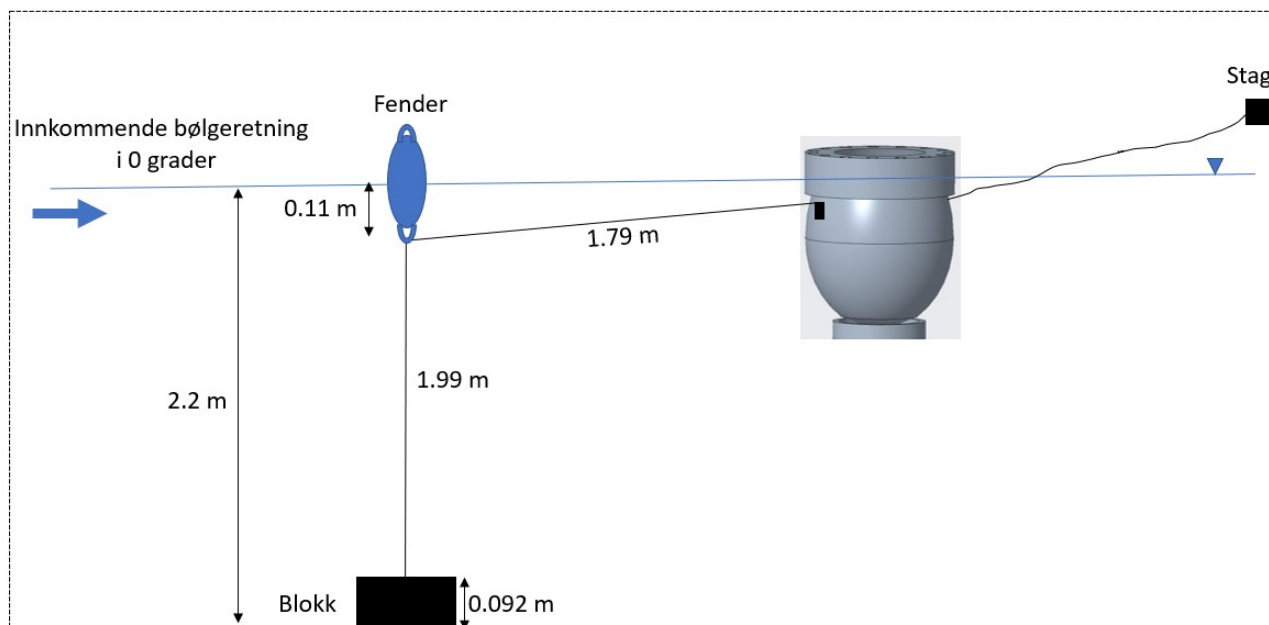
### 3.2.2 Ettpunktsforankring

Det andre oppsettet er ettpunktsforankring. Oppsettet sett ovenfra vises i Figur 30 og der blir det illustrert hvor bølgehøydemålerne og kameraene var i forhold til Egget<sup>®</sup>. Fenderen som er oppdriftsbøyen, ble festet med to fortøyningslinjer til Egget<sup>®</sup> og hadde en line som gikk ned til bunnen av tanken til blokken. Det ble festet til sammen to lastceller på Egget<sup>®</sup>, der de ble festet vertikalt på modellen. Fortøyningslinjen ble festet til lastcellen og lasten ble målt i newton. En av hovedforskjellene fra ettpunktsforankringen i forhold til rammefortøyningen er at linene til ettpunktsforankringen ikke ble festet med fjær, men bare rett på lastcellen.



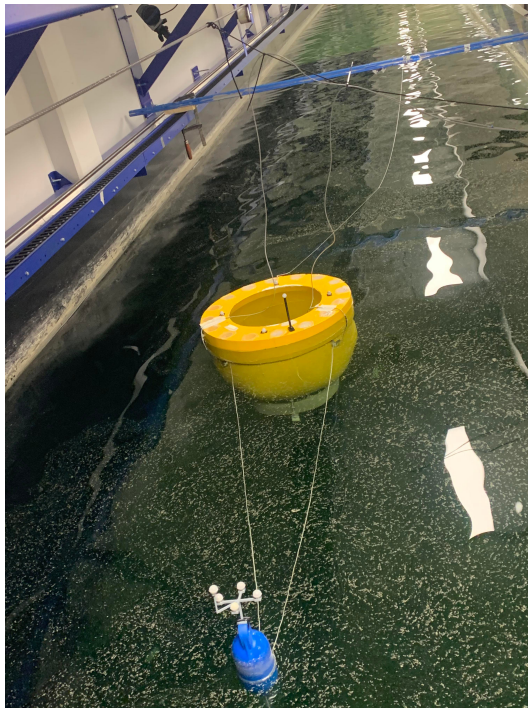
Figur 30: Skisse av ettpunktsforankringen til Egget<sup>®</sup> med bølgehøydemålere- og kamera plassering.

I Figur 31 blir det illustrert hvordan ettpunktsforankringen ser ut fra siden. Der en line var koblet til fenderen og ned til en blokk som sto midt i bølgetanken i bredden. Det var også festet en line fra fenderen til lastcellen, som igjen ble festet til Egget<sup>®</sup>. Det gikk også en line fra Egget<sup>®</sup> til staget. Denne linen hadde ikke en spesifikk lengde, ettersom den ble festet slakt for å hindre at Egget<sup>®</sup> skulle treffe tankveggene.



Figur 31: Skisse av forankringsoppsettet som ble brukt til ettpunktsforankringen til Egget<sup>®</sup>, sett fra siden.

Fra Figur 32 viser det et bilde på hvordan ettpunktsforankringen så ut når den ble satt opp i MarinLab. Tauene som hang over Egget<sup>®</sup> var ledningene fra lastcellene og kunne ha hatt en påvirkning til bevegelsen til Egget<sup>®</sup>.



Figur 32: Illustrasjon av ettpunktsforankringen til Egget<sup>®</sup>, tatt i MarinLab.

### 3.3 Eksperimentell fremgangsmåte

Fremgangsmåten som ble benyttet for denne masteroppgaven var å utføre eksperimentelle forsøk med to forankringsoppsett. Tabell 5 viser når de to oppsettene ble utført. Krengeprøven behøver bare å utføres en gang da ballasteringen er den samme i begge oppsettene.

Tabell 5: Testoppsett av testingen i MarinLab.

Forankringsoppsett	Forsøk	Uke	Årstall
Rammefortøyning	Krengeprøve	39	2022
	Decay-test	46	2022
	Regulær bølge	39	2022
	Irregulær bølge	46	2022
Ettpunktsforankring	Krengeprøve	-	-
	Decay-test	5	2023
	Regulær bølge	5	2023
	Irregulær bølge	5	2023

#### 3.3.1 Krengeprøve

Komponentene som ble benyttet under krengeprøven var digital vinkelmåler, millimeterpapir og vektlodd. Krengeprøven ble utført ved å ha en plate på overflaten til Egget<sup>®</sup>, og dette illustreres i Figur 33. På denne platen ble det plassert et millimeterpapir der det ble markert de ulike gradene og målene som vekten skulle flyttes til.



Figur 33: Illustrasjon av utførelsen av krengeprøven med vektlodd, millimeterpapir og vinkelmåler.



Vektene skulle flyttes i en viss vinkel hver gang og deretter ble grader og krengevinkel notert. I Tabell 6 blir det illustrert forflytningen, krengevinkelen og krengevinkel i [tan].

Tabell 6: Verdier fra krengeprøven.

Målepunkt	Forflytning [cm]	Krengevinkel [deg]	Tan-krengevinkel
1	0.05	-0.50	-0.009
2	0.10	-0.75	-0.013
3	0.15	-1.15	-0.020
4	0.20	-1.55	-0.027
5	0	0	0
6	-0.05	0.30	0.005
7	-0.10	0.60	0.011
8	-0.15	1.10	0.019
9	-0.20	1.45	0.025
10	-0.23	1.70	0.030

Fra krengeprøven ble det regnet ut hydrostatiske data og disse verdiene ble sammenlignet med numeriske hydrostatiske resultater, fra den parallelle masteroppgaven [7]. Verdiene som ble regnet ut er sett på fra et perspektiv der Egget<sup>®</sup> er lukket, og det indre vannvolumet er tatt med. Tabell 7 viser til resultatene for de hydrostatiske verdiene. Eksperiment modellskala viser beregnede hydrostatiske resultater som er hentet fra eksperimentelle målte verdier.  $KM$ -verdien fra SESAM-modellskala [7] er benyttet for å kunne regne ut  $GM$  for eksperiment modellskala. For å regne ut  $GM$  ble Ligning 2 benyttet, som hentes fra kapittel 2.3. For  $GM$ -verdien som er teoretisk, er denne hentet fra MATLAB.  $GM$ -verdien ble analysert med hensyn til verdiene fra krengeprøven og resultatet kom ut som et stigningstall. Det er derfor bare sett på  $GM$ -verdien (Teoretisk) fra MATLAB-skriptet. SESAM-modellskala og SESAM-fullskala er begge hentet fra den parallelle masteroppgaven [7]. Der SESAM-fullskala er hydrostatiske verdier der Egget<sup>®</sup> er i fullskala størrelse. SESAM er en programvarepakke som fungerer som en strukturell og hydrodynamisk analyse av offshorekonstruksjoner og skip. Forskyvningsformuleringen som den er basert på, heter Finite Element Method [11].

Tabell 7: Hydrostatisk data der Egget<sup>®</sup> er lukket, der det indre vannvolumet er tatt med.

Parameter	Eksperiment modellskala	Teoretisk	SESAM-modellskala	SESAM-fullskala
GM	0.047	0.047	0.049	1.055
KB	0.490	-	0.455	9.675
KG	0.444	-	0.441	9.373
GG <sub>2</sub>	0.012	-	0.013	0.273
KM	0.503	-	0.503	10.701

Fra Tabell 7 for eksperiment modellskala-verdiene og SESAM-verdiene observeres det et svar mellom resultatene. Dette viser at verdiene er på et akseptabelt hydrostatisk nivå og er positivt med tanke på videre analyser.

### 3.3.2 Decay-test

En decay-test som utføres i en bølgetank vil bli testet i stille vann. I denne masteroppgaven ble decay-testen utført både med- og uten fortøyning. Det ble utført tre tester for hver frihetsgrad ved decay-test uten fortøyning og fem tester for hver frihetsgrad for decay-test med fortøyning. Testen ble utført ved at Egget<sup>®</sup> ble presset ned med en lang stang på et bestemt sted på Egget<sup>®</sup>, og deretter ble sluppet fri. Når Egget<sup>®</sup> ble sluppet fri bevegde den seg i den retningen som ble påført, men vil etterhvert skape sin egen bevegelse. Dette fremhevet dempningen og egenfrekvensen til de ulike frihetsgradene. Ved enkelte frihetsgrader som hiv, rull og stamp oppstår det som regel en forandring i oppdrifts- og momentkrefter. For å kunne se om forankringsoppsettene hadde en påvirkning på egenbevegelsen til Egget<sup>®</sup>, var det relevant å sammenligne de testene med decay-tester uten fortøyning.

I MATLAB ble decay-testene analysert, og ved bruk av funksjonen lsurvefit ble et dataintervall kuttet ved en av de første svingningene, og deretter tilnærmet. Det forklares mer om lsurvefit under kapitlet 3.4.3.

### 3.3.3 Regulære bølger

De regulære bølgetestene ble gjennomført for begge oppsettene med ulike frekvenser. Kjøre-tiden til de regulære bølgene hadde en totaltid på 31 minutter, der kjøretiden til bølgene ble på et minutt og ventetiden på 30 minutter.

I Tabell 8 blir det presentert hvilke regulære bølger som ble kjørt og deres amplitude og frekvens. For rammefortøyningen ble det kjørt regulære bølger med frekvens fra 1.66 Hz til 0.78 Hz. For ettpunktsforankringen ble det lagt til en lavere frekvens, som lå på 0.62 Hz. Dette ble utført for å undersøke hvordan en lavere frekvens påvirket Egget<sup>®</sup>, når frekvensen lå nær egenfrekvensen i hiv, stamp og rull .

Tabell 8: Parameterne til de regulære bølgetestene.

Run-Nummer	Bølgenavn	Amplitude [m]	Frekvens [Hz]
1	RW15166	0.015	1.66
2	RW15147	0.015	1.47
3	RW15132	0.015	1.32
4	RW15120	0.015	1.20
5	RW15110	0.015	1.10
6	RW15102	0.015	1.02
7	RW15095	0.015	0.95
8	RW15088	0.015	0.88
9	RW15083	0.015	0.83
10	RW15078	0.015	0.78
11	RW15062	0.015	0.62

### 3.3.4 Irregulære bølger

For de irregulære bølgetestene, så ble JONSWAP- og white noise-bølger kjørt for begge oppsettene. Det ble utført nesten helt likt som de regulære bølgetestene. Forskjellen var kjøre- og ventetiden og parameterne til bølgene. Kjøretiden til en irregulær bølge var på 40 minutter og ventetiden var rundt 80 minutter. Under testingen av ettpunktsforankringen ble ventetiden bare på 30 minutter. Dette på grunn av det ble observert at ventetiden ikke trengte den lange perioden imellom. Grunnlaget for dette var at det ble observert at vannet var rolig nok til å kjøre etter 30 minutter. Den lange ventetiden skyldes at vannet blir urolig etter kjøring med de irregulære bølgene, og trenger derfor god tid for å ikke bli utsatt for forstyrrelser til neste test. Tabell 9 og 10 presenterer de ulike bølgehøydene og topperiodene som ble kjørt for de ulike irregulære bølgene.

Tabell 9: Parameterne til de irregulære bølgetestene for JONSWAP-bølgene.

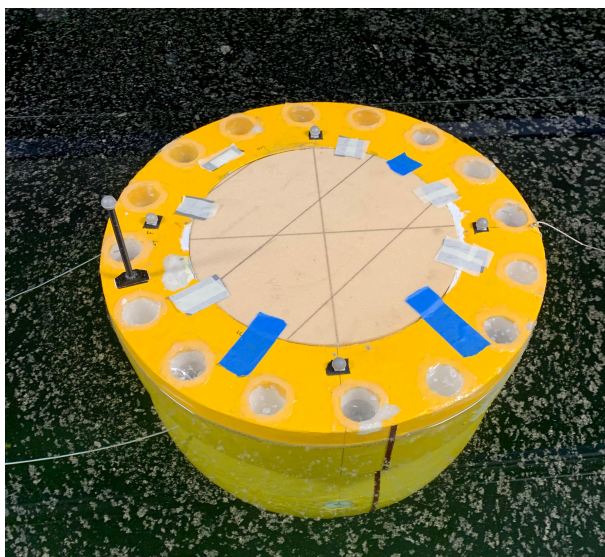
Bølgenavn	$H_s$ [m]	$T_p$ [s]
JS2510	0.025	1.0
JS2512	0.025	1.2

Tabell 10: Parameterne til de irregulære bølgetestene for white noise-bølgene.

Bølgenavn	$H_s$ [m]	Frekvens [Hz]
WN250105	0.025	0.1-0.5
WN250520	0.025	0.5-2.0

## Lokk på Egget<sup>®</sup> for å forminske sloshing

På den siste repetisjonen for de irregulære bølgene, ble det satt på et lokk på Egget<sup>®</sup>. Dette ble testet ut for å undersøke om lokket hadde en påvirkning på sloshingen som kunne oppstå ved vannmassen inne i Egget<sup>®</sup>. Dette kunne igjen påvirke bevegelsen til Egget<sup>®</sup> og ha en påvirkning på RAO-resultatene. Figur 34 illustrerer hvordan Egget<sup>®</sup> så ut med lokk.

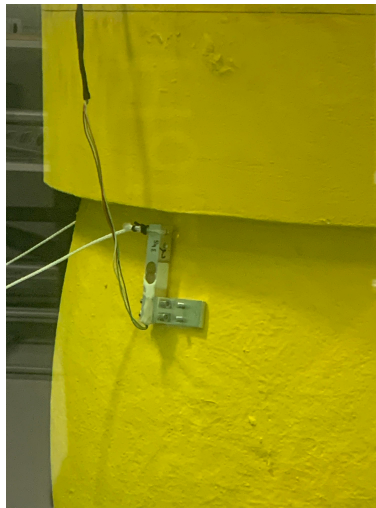


Figur 34: Egget<sup>®</sup> med lokk, for å redusere sloshing.

### 3.3.5 Lastcelle

For å kunne måle krefter på fortøyningslinene ble lastceller benyttet. Ved riktig bruk er lastcelle en pålitelig sensor som brukes for å kunne måle ønskelige krefter og dreiemoment [55]. Lastcellen som ble benyttet var en Straight Bar-lastcelle som hadde 3 kg i kapasitet [56]. Lastcellen ble bare brukt i oppsett nummer to, ettpunktsforankringen. Begge lastcellene befant seg under kragen til Egget<sup>®</sup>. Plasseringen blir illustrert i Figur 35.

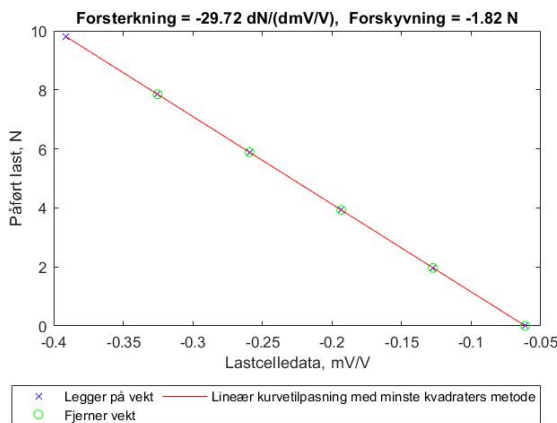
På bakgrunn av ettpunktsforankringen hadde lastcellene en tilnærmet jag-rettet bevegelse. Fra Figur 30 illustreres det at fortøyningslinen går fra fenderen til Egget<sup>®</sup> i jag-retningen. Lastcellen ble satt opp med en vinkel med to skruer som ble festet til Egget<sup>®</sup>. For å holde lastcellen relativt vannrett ble den smurt inn i silikon. Fortøyningslinen gikk fra enden til lastcellen, videre til fenderen som var festet til en blokk i bunnen av tanken.



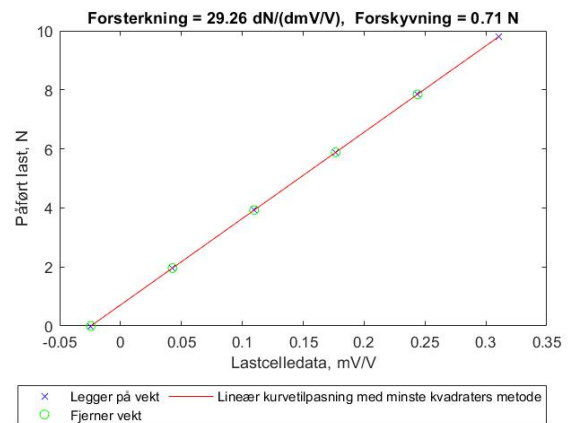
Figur 35: Plasseringen til lastcellen ved ettpunktsforankringen.

Lastcellene som ble benyttet gikk gjennom en datainnsamlingsenhet som het NI cDAQ-9174 fra National Instruments. Den vil styre synkroniseringen og dataoverføringen mellom NI C Series I/O-moduler og en ekstern vert [57]. For å kunne bruke lastcellen måtte den kalibreres. Måten dette ble utført på var å koble lastcellen til Egget<sup>®</sup> før den ble fraktet under vann. Dette ble utført i en slik posisjon som den ville blitt belastet med under forsøket. Det ble deretter lagt på en og en vekt til tauet som hang i lastcellen.

I Figur 36 og 37 blir det presentert påført last i forhold til lastcelldata til lastcelle 0 og lastcelle 1, som en lineær kurvetilpasning med minste kvadraters metode. Dette ble utført for å hente ut videre forsterkning til selve testingen og for å sjekke at verdiene som ble hentet ut, skapte en lineær funksjon. En lineær funksjon vil tilsi at lastcellen var velfungerende og kunne bli brukt videre.



Figur 36: Målt og kalibrert lastcelle 0 med lineær kurvetilpasning med minste kvadraters metode.



Figur 37: Målt og kalibrert lastcelle 1 med lineær kurvetilpasning med minste kvadraters metode.

Fra Figur 36 og 37 observeres det at lastcelle 0 og lastcelle 1 er begge lineære og kan bli brukt til videre testing. Kreftene som ble tatt opp i fortøyningslinen ble loggført ved bruk av et LabVIEW-program, som hadde en innebygd trigger. Triggeren ble utløst når wave control-programmet ble startet opp. Fra LabVIEW-programmet ble kreftene vist for de to lastcellene i forhold til hverandre.

### 3.3.6 Oppdriftsbøye

Til ettpunktsforankringen ble en fender benyttet og fungerte som en oppdriftsbøye. Hensikten til en oppdriftsbøye er å skape naturlig dempning og holdepunkt til Egget<sup>®</sup>. Fenderen som ble benyttet i oppsettet hadde en diameter på 0.09 m og en lengde på 0.30 m. Valget av størrelse på fenderen ble valgt for å representere en fullskala oppdriftsbøye med oppdrift på 62.8 kN [7]. Det ble bestemt en dypgang (T) til fenderen, for å vite hvor stramt fortøyningslinene skulle være fra fenderen ned til blokken på bunnen. Dypgangen ble satt til 11 cm, som blir illustrert i Figur 31. For å finne oppdriften til fenderen ble Arkimedes lov benyttet, som er nevnt i 2.3. Formelen for oppdrift er  $O = \rho g \nabla$  [16]. Der  $\rho$  er tettheten til ferskvannet som er  $1000 \text{ kg/m}^3$ ,  $g$  er tyngdeakselerasjonen som er  $9.81 \text{ m/s}^2$  og  $\nabla$  er volumdeplasementet. For å beregne oppdriften, måtte volumdeplasementet bli beregnet. Da kunne formelen for dypgang bli benyttet, og gitt som:

$$T = \frac{\Delta}{\rho \pi r^2}, \quad (18)$$

der radiusen,  $r$  er  $0.045^{-4} \text{ m}$  til fenderen. Massedeplasementet  $\Delta = \nabla \cdot \rho$ , og ved å snu om på formelen, ble volumdeplasementet  $7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$ . Fra dette ble oppdriften  $6.9 \text{ N}$ . For å kunne måle translasjonene og rotasjonene til fenderen ble det satt på en arm med reflektorer. Denne ble satt på skrå, slik at kameraene kunne fange opp alle reflektorene. Fenderen med reflektorene presenteres i Figur 38. I denne oppgaven ble det ikke sett på bevegelsene til fenderen.



Figur 38: Fender som blir benyttet som oppdriftsbøye med reflektorer på.



### 3.4 Databehandling

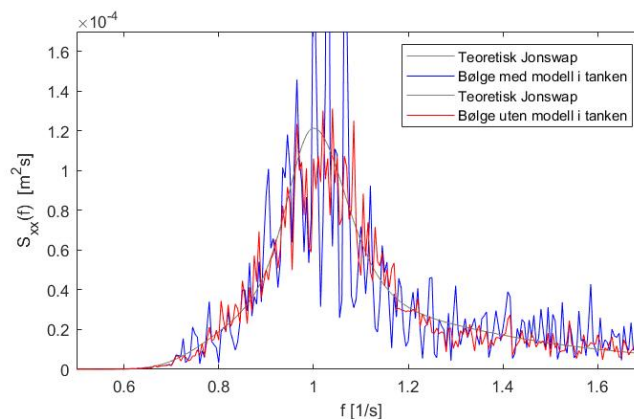
I databehandlingen ble MATLAB benyttet for å få ut resultatene av de ulike testene som ble utført på MarinLab. I MATLAB ble bølgedata hentet fra programmet Wave Client og data fra Qualisys Track Manager (QTM). Fra MATLAB er det ulike kommandoer som skal forklares i dette kapittelet. Det skal også presenteres valg av bølgehøydemåler og valg av windowNr. I Tabell 11 blir det presentert en utstyrsliste i form av samplingsfrekvenser til de tre målesystemene som ble benyttet.

Tabell 11: Utstyrsliste i form av designer og samplingsfrekvenser

Utstyr	Designer	Samplingsfrekvens [Hz]
Bølgehøydemåler	Edinburgh design	128
Qualisys	Oqus 500 serie	100
Lastcelldata	National Instruments	100

#### 3.4.1 Bølgekalibrering-JONSWAP

For begge oppsettene ble det benyttet ferdig kalibrerte bølger, som hadde blitt kalibrert tidligere i MarinLab. Bølgene ble designet i programmet Njord Wave Synthesiser av Edinburgh Design [52]. For å kunne se hvor stor påvirkning modellen har på bølgen, blir det illustrert i Figur 39 en bølge uten modell i tanken, og en med modellen i tanken. Der bølgehøydemåler nummer en er benyttet. Det observeres en stor varians mellom når modellen er i tanken og når modellen ikke er i tanken.

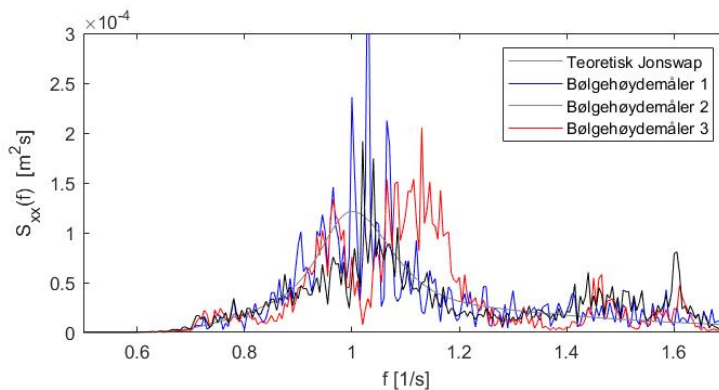


Figur 39: Bølgespekter med bølge uten- og med modell med hver deres teoretiske JONSWAP.

### 3.4.2 Valg av bølgehøydemåler

For å analysere testene i MATLAB, ble en bølgehøydemåler valgt. Valg av bølgehøydemåler var viktig for å få inn presis og nøyaktig data. I MATLAB, kalles bølgehøydemålere for gaugeNr og ble valgt tidlig i skriptet. Fra Figur 27 og 30 i kapittel 3.2 blir det illustrert hvor i tanken de ulike bølgehøydemålerne var satt opp i de to oppsettene. Det ble benyttet bølgehøydemålere hele tiden, under alle testene.

Bølgehøydemåler nummer en sto lengst unna modellen for begge oppsettene. Denne kunne få en mindre påvirkning av refleksjonene fra modellen, og hypotetisk sett ha hatt mindre påvirkede resultater. For å teste hvilken bølgehøydemåler som egner seg best er det hentet ut resultater fra rammefortøyningen. Der lå bølgehøydemåler nummer to rett foran modellen for å få bølger som reflekterte fra modellen mot seg. Bølgehøydemåler nummer tre sto på siden av modellen og ville ikke bare få refleksjoner fra modellen, men også fra tankveggen. Dette utgjør hypotetisk sett at bølgehøydemåler nummer en det beste alternativet hittil. For å bekrefte hypotesen om at bølgehøydemåler nummer en vil gi de minst påvirkede resultatene, må det utføres tester som kan bevise dette. Modellen ville også påvirke bølgene som ble lagd i tanken og som dermed ville påvirke bølgehøydemålerne. I Figur 40 blir de ulike bølgehøydemålerne illustrert.



Figur 40: Bølgespekter med de tre ulike bølgehøydemålerne.

Ved å se på bølgehøydemåler nummer tre blir det observert en bunn rundt 1 Hz. Dette tilsier at nummer tre får et dropp i energien som kan komme av modellens påvirkning og refleksjonen fra modellen eller fra bølgetanken. Bølgehøydemåler nummer to har noe bedre resultater enn nummer tre, men denne har også et lite energidropp. Bølgehøydemåler nummer en viser bedre resultater. Med utgangspunkt i dette blir det konkludert at bølgehøydemåler nummer en er bølgehøydemåleren som gir de mest upåvirkede resultatene og blir dermed benyttet videre.

### Kvadratrotten av gjennomsnittlig kvadrert avvik

Denne funksjonen heter RMSE på engelsk, og betyr root mean square error. Funksjonen har som hensikt å fortelle hvor konsentrert verdiene er, og for å måle modellytelse [58]. Den matematiske formelen for RMSE er gitt som:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2}, \quad (19)$$

der  $n$  er antall datapunkter av modellfeil,  $i$  er hvor datapunktet starter og  $e$  er differansen mellom observasjoner og verdier [58]. I masteroppgaven ble funksjonen RMSE benyttet for å kunne beregne RMSE for datakildene  $S_{xx}$  og  $S_{xx}$ -theory. I Tabell 12 er det presentert RMSE-verdiene til de ulike bølgehøydemålerne, for de ulike bølgene. RMSE-resultatene ble skrevet ut i prosent, og grunnen til dette var for å se hvor stor prosentandel feil resultatet hadde for de to datakildene. For JS2512-bølgen hadde den en lavere RMSE-verdier enn for JS2510-bølgen. Det blir illustrert ved at bølgehøydemåler nummer tre for begge testene hadde de laveste verdiene. Observasjonen tilsier at bølgehøydemåler nummer to hadde de høyeste verdiene.

Tabell 12: RMSE-verdiene til de ulike bølgehøydemålerne fra rammefortøyningen.

Bølge	Bølgehøydemåler	RMSE-verdi i prosent
JS2510	1	3.844
JS2510	2	3.977
JS2510	3	2.718
JS2512	1	2.416
JS2512	2	2.948
JS2512	3	2.146

Fra Tabell 12 gir det ingen konkrete svar på bølgehøydemålerne kvalitet. Den gir heller en indikasjon på om bølgehøydemålerne er anvendbare eller ikke. Hvis resultatet hadde hatt en høy prosentdel hadde dette måtte bli tatt i betraktning, og kalibreringen måtte ha blitt revurdert. Resultatet fra Tabell 12 er gjennomsnittlig brukbare, og samsvarer med konklusjonen fra 3.4.2 om at bølgehøydemåler nummer en kunne bli benyttet videre.

### 3.4.3 Kurvetilpasning

Funksjonen `lsqcurvefit`, som blir oversatt som kurvetilpasning på norsk, ble brukt i MATLAB for å analysere decay-testene. `lsqcurvefit` ble benyttet for å kunne løse en ikke lineær kurvetilpasning, som er en datatilpasning for den minste kvadratsmetoden til en dempet sinus svingning [59]. Decay-skriptet analyserte de ulike decay-testene for de ulike frihetsgradene. Ligningen som ble benyttet for `lsqcurvefit` er avledet fra Ligning 16, som igjen ble benyttet i MATLAB-skriptet. Originalt skrives den som  $x = \text{lsqcurvefit}(fun, x0, xdata, ydata)$  [59], men i MATLAB-skriptet som ble benyttet, ble den skrevet som:

```
x = lsqcurvefit(@expsin, x, t, v)
```

der `expsin` er en funksjon som beskriver eksponentiell sinusformet bølgebevegelse. Parametere  $x$  er verdier for modellen,  $t$  er en vektor som omhandler tidspunktene og  $v$  er alle dataene som skal tilpasses i en vektor.

### 3.4.4 Frekvensplananalyse

Funksjonen `pwelch` står for Welch's power spectral density estimate, og i programmet MATLAB vil denne funksjonen ha som hensikt å regne ut et estimat for hver frekvensbeholder. Dette ble utført ved at den beregner gjennomsnittet av effektspekteret for alle segmentene som ble brukt i ligningen. Funksjonen er en Fast Fourier transform metode (FFT), som har som hensikt å omgjøre tidsserien til et frekvensplan [60]. `Pwelch`-funksjonen ble benyttet i MATLAB-skriptet i denne masteroppgaven for de irregulære bølgene. Den originale `pwelch` funksjonen skrives som  $[pxx, f] = \text{pwelch}(x, window, noverlap, f, fs)$  [61], men i MATLAB-skriptet som ble benyttet i oppgaven ble den gitt som:

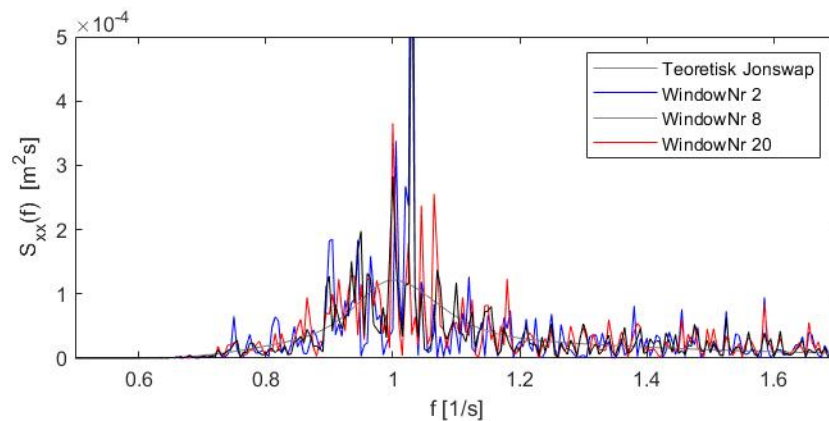
```
Sxx = 2* pwelch(w.data, round(length(w.data)/windownr),round(50), f, w.freq)
```

Her er  $S_{xx}$  bølgespekteret, og grunnen til at ligningen blir ganget med to er for å få den energien som er i den negative frekvensen til den positive frekvensen. Funksjonen `w.data` hentes fra bølgedata og `windowNr` forteller noe om hvor tidsserien ligger. Bølgedata samples ned fra 128 Hz med interpolering til 100 Hz.

For  $S_{yy}$  som er responspekteret er det samme ligning, men med inndata fra respektive frihetsgrader og samplingsfrekvens til Qualisys, som er på 100 Hz.

## Segmentnummer

WindowNr, også kalt segmentnummer på norsk er en egendefinert variabel, som blir benyttet i analyser til pwelch-funksjonen [61]. For å få grafen i plottet mer jevn i forhold til tidsrekken, kunne WindowNr benyttes, for å endre på hvor detaljert funksjonen skulle være. For å kunne bruke windowNr, ble et fast tall valgt for å enten skape en mindre eller mer detaljert funksjon. Dette kan bety at hvis tallet er for høyt, kan grafen bli for jevn til at enkelte egenfrekvenser forsvinner. Dette vil si at, jo mindre tallet er, desto mer detaljert vil grafen være. Grunnen til at windowNr er en viktig funksjon er fordi i programmet er det en endelig tidsdata som ikke kan ta inn alle frekvensene for den tiden forsøket kjøres i MarinLab. På grunn kjøretiden til bølgene i MarinLab, så går ikke tidsserien fra  $-\infty$  til  $\infty$ . Dette tilsier at windowNr må bli bestemt og blir bestemt etter hvor mye av funksjonen som ønskes å vises. For å avgjøre hvilke windowNr som er best å bruke i videre analyser, er det sett på tre ulike windowNr. Dette er utført for å bestemme hvilken windowNr som er mest praktisk å benytte seg av. I Figur 41 blir det illustrert tre ulike grafer med ulike windowNr og det teoretiske JONSWAP-spekteret.

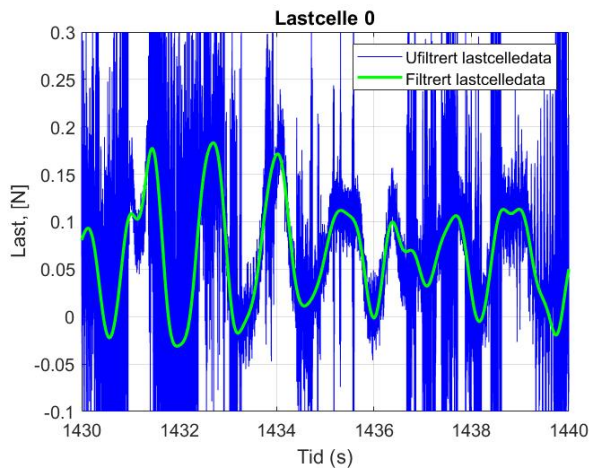


Figur 41: Bølgespekter med de tre ulike windowNr.

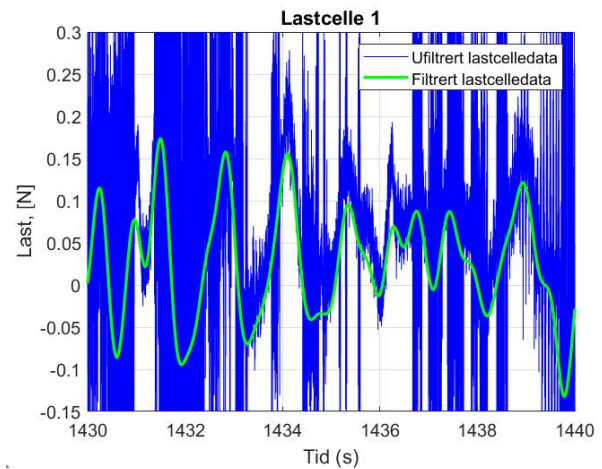
Fra Figur 41 blir det illustrert at de ulike windowNr ikke har en så stor forskjell. Forskjellen er at bølgen med windowNr 2 har høyere topp enn windowNr 20. De bølgene med lavest windowNr får med seg egenfrekvensene bedre enn de med høyere windowNr. I denne oppgaven er det viktig å ha med de relevante egenfrekvensene, så en høy windowNr er ikke relevant. En bølge med mange detaljer, og for lavt windowNr, er ikke interessant for denne oppgaven. Derfor konkluderes det med at windowNr 8 er et godt nok alternativ til videre analyser.

### 3.4.5 Databehandling av lastcelledata

I MATLAB ble det analysert last i newton for begge lastcellene som ble benyttet under forsøket. I Figur 42 og 43 blir det illustrert ufiltrert- og filtrert lastcelledata i en begrenset tidsserie. På  $y$ -aksen er lastcellespenningen i newton og på  $x$ -aksen er tid i [s]. Observasjonene tilsier at lastcelle 0 hadde mindre støy i den ufiltrerte lastcelledataen, enn lastcelle 1. Dette kan være en av forklaringene på hvorfor lastcelle 1 måtte bli byttet ut underveis av testingen. Dette kan ha en stor betydning for resultatene som kommer fra lastcelle 1. Det observeres også at begge de filtrerte lastcellene følger kurven til den ufiltrerte lastcelledataen.



Figur 42: Illustrasjon av den ufiltrerte- og den filtrerte lastcelledata fra lastcelle 0.



Figur 43: Illustrasjon av den ufiltrerte- og den filtrerte lastcelledata fra lastcelle 1.

Funksjonen som ble brukt i MATLAB for å filtrere lastcelledata var Butterworth funksjonen. Butterworth funksjonen ble benyttet for å fjerne uønskede frekvenser fra et signal som oppstår når en henter ut datainnhold. Signaler som kan være uønskede er støy, og i dette tilfelle er støyet i form av elektrisk støy. Den elektriske støyen foreligger rundt om i tanken på Marin-Lab. For å kunne bruke Butterworth funksjonen i MATLAB, ble funksjonen *butter* skrevet inn. Den originale funksjonen blir skrevet som  $[b, a] = \text{butter}(n, Wn, ftype)$  [62]. Funksjonen som ble skrevet inn i MATLAB-skriptet for å filtrere de uønskede signalene ble skrevet som:

```
[b,a]=butter(4, cutout./(w.freq/2), low)
```

Der er tallet fire en *order* som forteller hvordan rekkefølgen til filteret skal bli designet, og kalles  $n$  i den originale ligningen. Tallet som bestemmes, blir bestemt med tanke på brattheten til filteret og hvordan frekvensen ligger med tanke på passbåndet. *Cutout* er samplingfrekvensen som bestemmes av om det er et lav-, bånd- eller høypassfilter. I dette tilfelle er det et lavpassfilter. I resultatdelen for lastcelledataene blir det presentert lastresponspekter ( $P_{yy}(f)$ ) og RAO-spekteret ( $H(f)$ ). Der ( $P_{yy}(f)$ ) er lastresponsen til lastcellene, og er tilnærmet som Ligning 11, bare i Ligning 20 blir ( $S_{yy}(f)$ ) byttet mot ( $P_{yy}(f)$ ). Lastresponsen ( $P_{yy}(f)$ ) blir også benyttet under respons- og RAO-spektrene for lastcelledataene i resultatdelen.

$$H(\omega) = \sqrt{\frac{P_{yy}}{S_{xx}}}. \quad (20)$$

### 3.5 Feilkilder

Med Egget<sup>®</sup> som modell og nevnte eksperimentelle metoder, kan det forventes følgende feilkilder:

- Refleksjoner fra vannet kan ha påvirket data fra Qualisys ved bevegelsene fra modellen, som oppsto ved oppstart av ny målesekvens.
- Bruken av lastceller som ikke var beregnet til å være neddykket i vann kan påvirke resultatene til lastcellene.
- Forskjellen fra den numeriske modellen og fysiske modellen med tanke på beregninger. Den numeriske vil bevege seg i alle frihetsgrader, der den fysiske modellen i modellskala ville ha en begrenset bevegelse i forhold til frihetsgrader, siden den var forankret.
- Ved uregelmessige bølger kan bølgerrefleksjonen fra tankveggen være med på å danne ikke-homogene og ikke-stasjonære effekter. Dette kan være på grunn av interferens mellom reflektert- og innkommende bølge.
- Viskøs demping kan være et problem og skape støy i målingene.
- Etter testingen av de regulære bølgene for ettpunktsforankringen tok Egget<sup>®</sup> inn en del vann. Vannet kom inn i Egget<sup>®</sup> via kragen og påførte Egget<sup>®</sup> mer tyngde. Dette medførte at fribordet ble mindre enn beregnet.
- Elektrisk støy kunne oppstå under testingen og kunne ha en påvirkning på lastcelledataen.

- Linestivheten til rammefortøyningen hadde en usikkerhet i forhold til fjærene som ble benyttet. Etter hvert forsøk ble fjærene strukket ut og skapte en form for deformasjon. Dette kan resultere i at linelengden og stivheten til systemet kunne variere.

### 3.6 Begrensninger

- Egget<sup>®</sup> er en nedskalert modell av fullskala modell. Dette kan gjøre at enkelte beregninger og resultater kan avvike fra de numeriske resultatene. Samtidig er ikke MarinLab stor nok til å klare å teste ut virkeligheten til et forankringssystem, så skaleringer måtte bli foretatt for å kunne sammenligne resultatene. Etterligningen fra fullskala modell er en utfordring med tanke på friksjon og viskøse krefter. De viskøse kreftene har mye å si for linene som baserer seg på Reynoldstall. Dette er problematisk, ettersom det er vanskelig å etterligne samme Reynoldstall på laboratoriet. Reynoldstall er dermed ikke tatt med i denne oppgaven. Dette gjør at resultatene som kom ut, er et begrenset estimat på realiteten.
- I denne oppgaven blir det forsøkt å etterligne stivheten i fortøyningslinene til den numeriske forenklete modellen, ved å bruke skaleringsformlene. I virkeligheten kan det kanskje variere på grunn av kjetting og andre komponenter som ikke ble brukt til dette forsøket.
- Testanlegget sine begrensninger, slik som veggeffekter, bølgegrenser og tankdybden i forhold til et fullt skalert forankringssystem.
- Støy, som kan komme av bølgetanken.
- Mange repetisjoner på de enkelte testene gjør det vanskelig å ta med alle resultatene. Derfor er det bare noen av resultatene som er tatt med i selve oppgaven.



## 4 Resultat og diskusjon

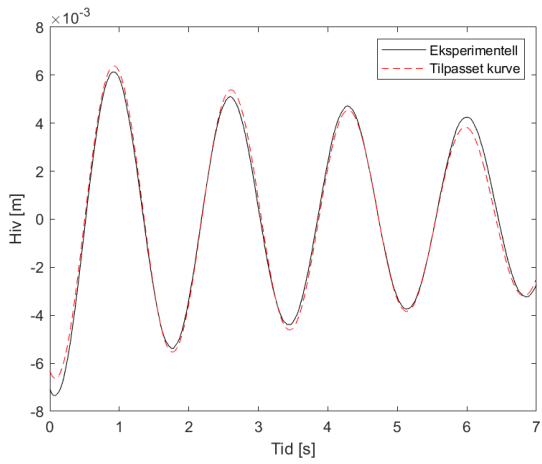
I denne delen av masteroppgaven presenteres resultatene fra de utførte forsøkene. Resultatkapittelet er delt opp i fire deler, der den første delen fokuserer på resultatene for decay-testene. Videre introduseres de regulære bølgetestene, fulgt av de irregulære bølgetestene. Innenfor de irregulære bølgetestene blir JONSWAP-testene og white noise-bølgene presentert. For ettpunktsforankringen blir også lastcelledataen introdusert. I alle disse delene blir begge oppsettene analysert og vurdert. På slutten av resultat- og diskusjonskapittelet blir resultatene sammenlignet mellom rammefortøyningen og ettpunktsforankringen. Deretter følger en sammenligning mellom de numeriske- og eksperimentelle dataene. For alle de irregulære bølgetestene, både for rammefortøyning og ettpunktsforankring, er det inkludert et utsnitt av grafen i en liten boks oppe i høyre hjørne. Dette utsnittet presenterer den delen av grafen som er mest verdifull. Testene ble utført i MarinLab og er videre analysert i MATLAB [10].

### 4.1 Decay-tester

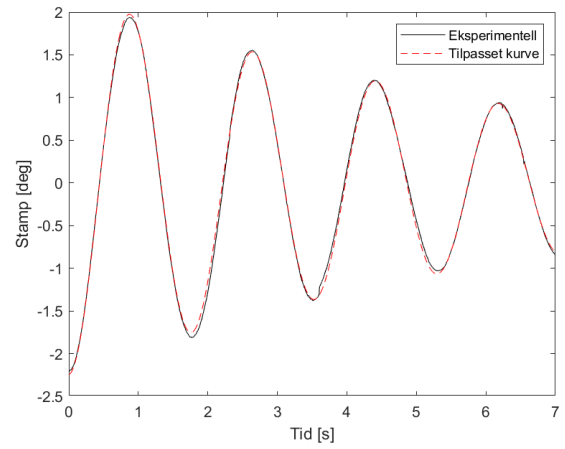
I denne delen av resultater blir det presentert decay-tester uten fortøyning, decay-tester for rammefortøyning og ettpunktsforankring, og til slutt en sammenligningsdel. Verdiene blir sammenlignet i Tabell 13 for begge oppsettene. Fra decay-testene er det lagt vekt på frihetsgradene jag, hiv, gir, stamp og rull. For ettpunktsforankringen blir det bare sett på frihetsgradene hiv, stamp og rull.

#### 4.1.1 Decay-tester uten fortøyning

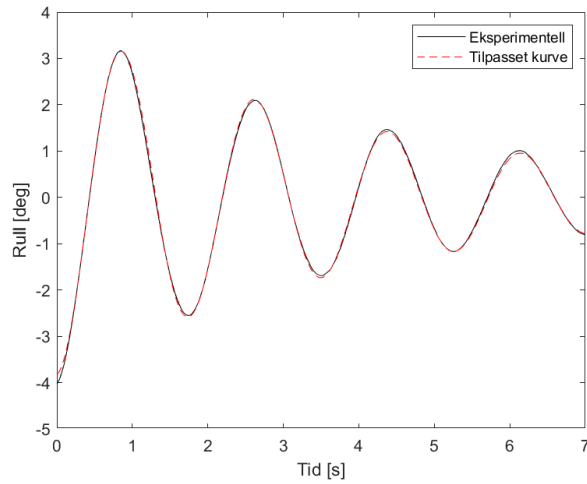
Det ble utført tre decay-tester uten fortøyning for hver frihetsgrad i hiv, stamp og rull. Dette ble gjennomført for å se hvor stor påvirkning testoppsettene har på modellen i forhold til modellen uten fortøyning. I Figur 44 - 46 illustreres decay-testene uten fortøyning med de ulike frihetsgradene. Ved hver frihetsgrad er det egenfrekvens, dempning og perioden som er fokuset. Valget av figur er benyttet av den beste tilpasset kurven. Hver figur har en  $x$ -akse som viser tidsserien i [s] opp imot  $y$ -aksen som viser den valgte frihetsgraden som enten er i meter [m] eller grader [deg]. I Figur 44 vises decay-test uten fortøyning i hiv og det blir observert at kurvetilpasningen har et lite avvik i den reelle kurven. Dette kan komme av forstyrrelser, eksempelvis fra tankens veggrefleksjoner. Ved å se bort i fra veggrefleksjonene, så viser den eksperimentelle kurven likheter for den tilpassede kurven.



Figur 44: Resultat av decay-test uten forstøyning i frihetsgraden hiv.



Figur 45: Resultat av decay-test uten forstøyning i frihetsgraden stamp.



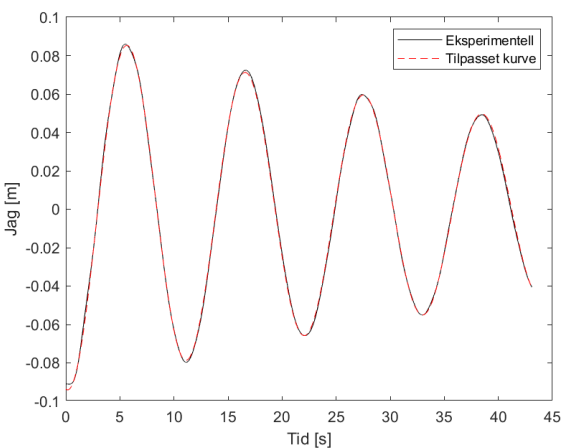
Figur 46: Resultat av decay-test uten forstøyning i frihetsgraden rull.

### 4.1.2 Decay-tester - rammefortøyning

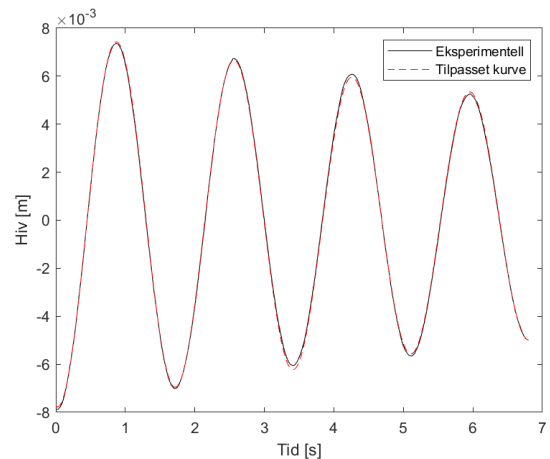
For decay-testene med fortøyning er det utført fem tester for hver frihetsgrad og de frihetsgradene som er benyttet i denne testen er jag, hiv, gir, stamp og rull. Egenfrekvensen, dempningen og perioden vises i Tabell 13. I Figur 47 presenteres frihetsgraden jag, og i Tabell 13 viser det en begrenset variasjon av dempningsverdier. Siden jag er en translasjon i  $x$ -retning, vil den frihetsgraden være med på å skape bølger som er korte og treffer tankveggen. Dette kan medføre refleksjoner som kan skape forstyrrelser til bevegelsen.

Ved utførelsen av frihetsgraden hiv vil Egget<sup>®</sup> bevege seg opp og ned i vannmassen. Resultatene fra decay-testene i Tabell 13 for hiv og stamp er at dempningen, egenfrekvensen og perioden er relativt lik og det ser ikke ut som at tankveggen har noe stor effekt. I Figur 48 og 50 er det illustrert decay-test i frihetsgraden hiv og stamp. Det som blir presentert er en decay-kurve som passer godt mot den tilpassete kurven. I Figur 49 blir decay-testen gir presentert og viser en kurve som har et fullstendig samsvar med den tilpassede kurven.

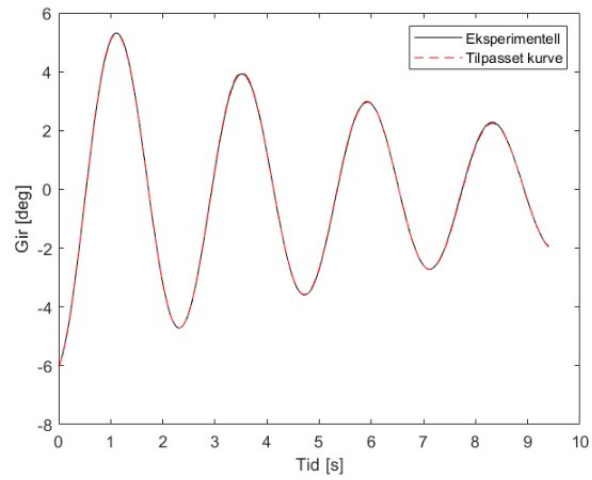
Gjennomførelsen av frihetsgraden rull er å trykke Egget<sup>®</sup> ned mot en side, og ned mot vannet. Dette medfører en rotasjon rundt  $x$ -aksen og kan føre til en potensiell feilkilde. Til vanlig kan verdiene i rull være lik verdiene i stamp, men fra observasjonene i Tabell 13 er dempningen litt ulik. Denne differansen kan oppstå på grunn av at bølgen treffer tankveggen og blir reflektert tilbake til Egget<sup>®</sup>. Dette impliserer i et variert resultat i dempningen, som igjen reflekterer til hvorfor noen av plottene viser en forskjell fra selve decay-testen til den tilpassete kurven. Dette blir illustrert i Figur 51.



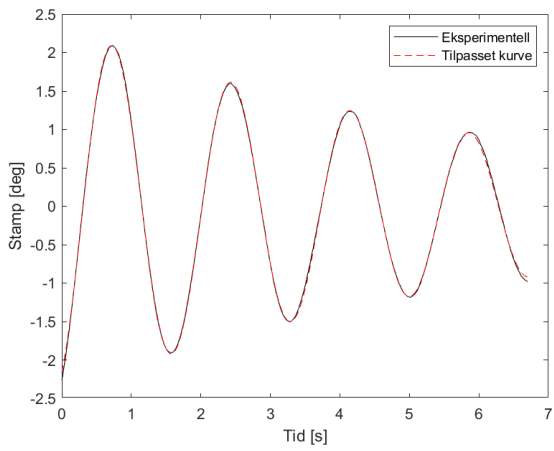
Figur 47: Resultat av decay-test i frihetsgraden jag for rammefortøyningen.



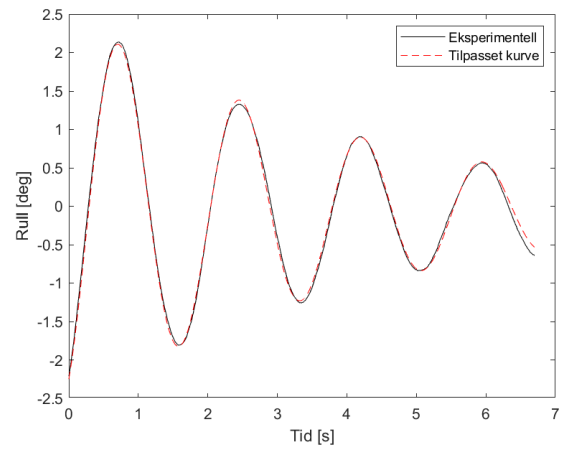
Figur 48: Resultat av decay-test i frihetsgraden hiv for rammefortøyningen.



Figur 49: Resultat av decay-test i frihetsgraden gir for rammefortøyningen.



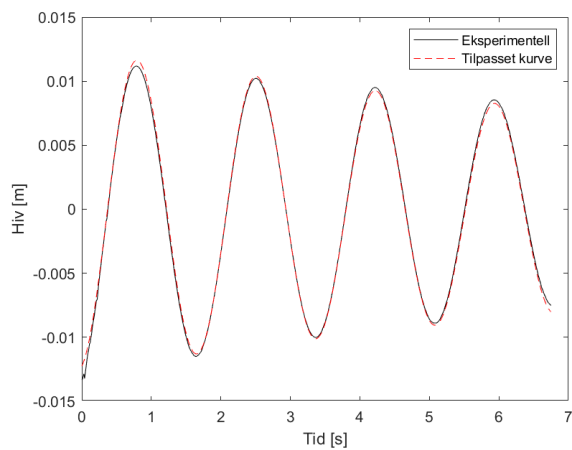
Figur 50: Resultat av decay-test i frihetsgraden stamp for rammefortøyningen.



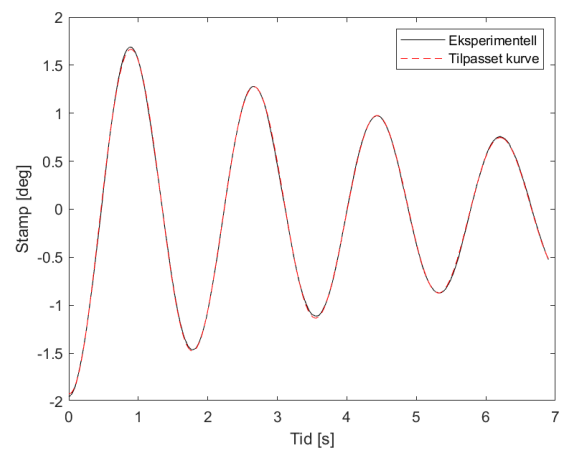
Figur 51: Resultat av decay-test i frihetsgraden rull for rammefortøyningen.

### 4.1.3 Decay-tester - ettpunktsforankring

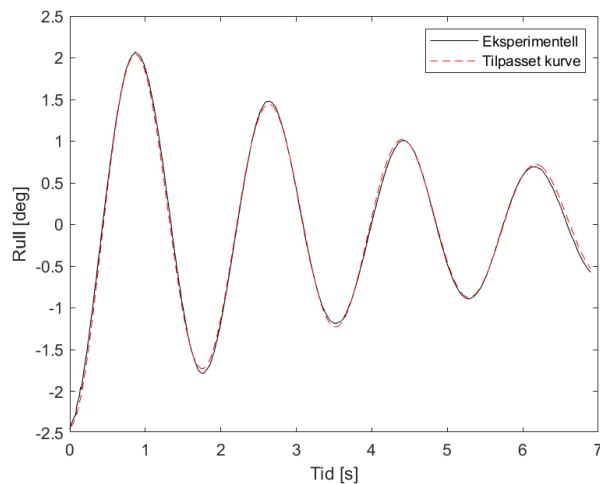
Figurene 52 - 54 presenterer decay-testene som ble utført for ettpunktsforankringen. I analysene ble kun frihetsgradene hiv, stamp og rull tatt i betraktning. Dette er på grunn av at resultatene i jag, svai og gir ble utydelig ettersom de får en lang og vag bevegelse i den retningen. Resultatet av de vage bevegelsene kan komme av at fortøyninglinene ikke er festet med fjærer, men heller rett til lastcellen. I Figurene 52 - 54 illustrer de at tilnærmingen fra den tilpassede kurven og eksperimentelt samsvarer bra. Dette indikerer at ut ifra disse frihetsgradene ser oppsettet velegnet ut.



Figur 52: Resultat av decay-test i frihetsgraden hiv for ettpunktsforankringen.



Figur 53: Resultat av decay-test i frihetsgraden stamp for ettpunktsforankringen.



Figur 54: Resultat av decay-test i frihetsgraden rull for ettpunktsforankringen.

#### 4.1.4 Sammenligning

I Tabell 13 blir det illustrert gjennomsnittet av decay-testene uten fortøyning, rammefortøyningen og ettpunktsforankringen til de ulike frihetsgradene. Der egenfrekvensen  $Hz$  er gitt som  $(f) = \frac{1}{T}$ .  $\zeta$  står for dempningskoeffisienten og er enhetsløs og egenperioden (T), skrives som periode (s) i tabellen. Årsaken til at det ikke er utført nye tester av decay uten fortøyning, er at dette ikke er nødvendig siden de mest sannsynlig hadde fått de samme resultatene.

Forskjellen på decay-testene uten- og med fortøyning er ikke relativ store for de to oppsettene. I Tabell 13 vises det at decay-testene for ettpunktsforankringen har de samme tendensene som for rammefortøyningen. Der forskjellene i frekvens ikke er signifikant.

Tabell 13: Gjennomsnittet av resultatene fra decay-testene uten- og med fortøyning for begge oppsettene

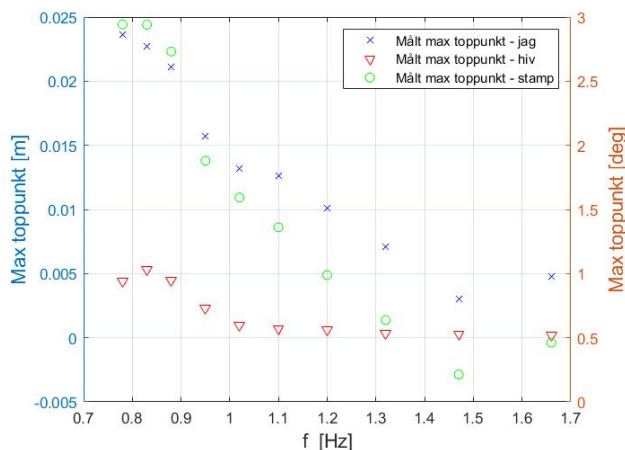
Fortøyning	Frihetsgrader	Egenfrekvens [ $Hz$ ]	$\zeta$	Periode [s]
Decay-uten fortøyning	Jag	-	-	-
	Hiv	0.589	0.016	1.696
	Gir	-	-	-
	Stamp	0.584	0.043	1.713
	Rull	0.593	0.065	1.688
Rammefortøyning	Jag	0.091	0.031	10.98
	Hiv	0.592	0.024	1.688
	Gir	0.416	0.047	2.404
	Stamp	0.542	0.042	1.769
	Rull	0.565	0.066	1.767
Ettpunktsforankring	Jag	-	-	-
	Hiv	0.583	0.018	1.715
	Gir	-	-	-
	Stamp	0.565	0.044	1.771
	Rull	0.566	0.058	1.767

## 4.2 Regulære bølger

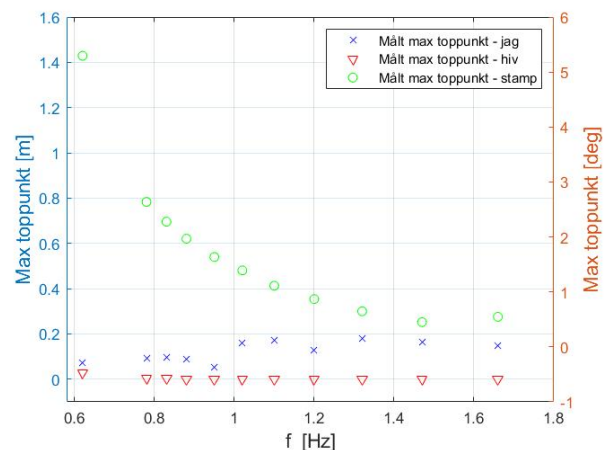
I denne delen av resultatene skal de regulære bølgene for de to oppsettene presenteres. For begge figurene blir det tatt hensyn på frihetsgraden jag, hiv og stamp. Fra Figur 55 blir de regulære bølgene for rammefortøyningen illustrert, og hvor middelerdien av ti bølgetopper er analysert. I Figur 56 blir de regulære bølgene for ettpunktsforankringen illustrert, der det er analysert middelerdien av 11 bølgetopper.

For rammefortøyningen i Figur 55 blir det observert at jag og stamp er den frihetsgraden som har høyest toppunkt rundt den laveste frekvensen. En uventet forventning er at jag-bevegelsen har nesten like høye verdier som stamp-bevegelsen. Det som er forventet er at jag-bevegelsen øker først når egenperioden til jag testes med bølgen. En årsak til påvirkningen av jag-bevegelsen kan være at den har blitt påvirket av hiv- og stamp bevegelsene. Disse to bevegelsene kan initiere en større jag-bevegelse. Egget<sup>®</sup> sin egenfrekvens ligger på rundt 0.58 Hz i frihetsgraden hiv, stamp og rull, så det at hiv er høy kan stemme.

For ettpunktsforankringen i Figur 56 ble det prøvekjørt en lavere frekvens på 0.62 Hz. Resultatet ble at Egget<sup>®</sup> fikk en stor bevegelse i frihetsgraden stamp og tok inn mye vann. Årsaken kan være at den siste repetisjonen var nær egenfrekvensen til Egget<sup>®</sup> i hiv, stamp og rull, som ligger på rundt 0.58 Hz. Resultatet viser at frihetsgraden stamp har høyere toppunkter jo lavere frekvens bølgen har. Grunnen til de reduserte toppunktene for frihetsgradene jag og hiv i forhold til de regulære bølgene for rammefortøyningene, kan skyldes at stampbevegelsen frembringer en høyere respons som overstyrer de andre frihetsgradene.



Figur 55: Regulære bølgene ved målt max toppunkt for rammefortøyningen



Figur 56: Regulære bølgene ved målt max toppunkt for ettpunktsforankringen

### 4.3 Irregulære bølger

I dette underkapittelet blir de eksperimentelle irregulære bølgene introdusert i form av et bølgespekter, respons- og RAO-spekter. Denne delen er delt opp i tre deler, der den første delen omhandler rammefortøyningen og andre del fokuserer på ettpunktsforankringen. For rammefortøyningen er det bare JONSWAP- og white noise-bølgene som er presentert. For ettpunktsforankringen er det JONSWAP med og uten lastcelle, JONSWAP med og uten lokk, white noise og lastcelldata som blir presentert. Den siste delen omhandler sammenligning mellom de to oppsettene og sammenligning med numeriske resultater fra en parallell master-oppgave [7]. Frihetsgradene som blir presentert er jag, hiv, stamp og rull. I Tabell 14 blir det illustrert hva DOF betyr i forhold til frihetsgraden. DOF som står øverst på hver figur for de irregulære- og white noise-bølgene forteller om hvilken frihetsgrad det er. I hver figur blir det illustrert egenfrekvenser til de ulike frihetsgradene. For analysering av disse bølgene blir bølgehøydemåler nummer en benyttet.

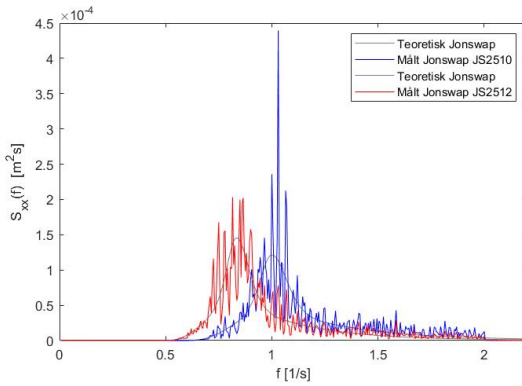
Tabell 14: DOF i forhold til frihetsgrad

DOF	Frihetsgrad
1	Jag
3	Hiv
5	Stamp
6	Rull

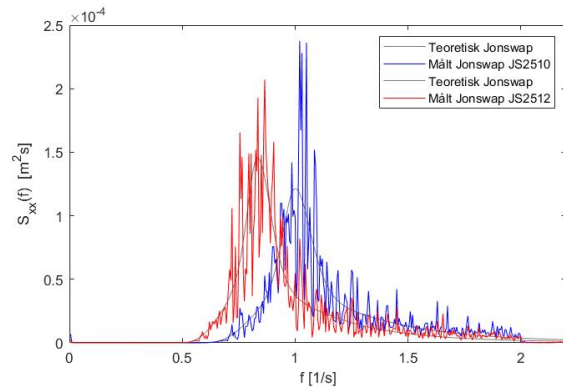
#### 4.3.1 JONSWAP - bølgespekter

I denne delen av de irregulære bølgene skal bølgespektrene ( $S_{xx}$ ) for JONSWAP-bølgene til de to oppsettene presenteres. Det observeres en variasjon mellom begge bølgespektrene for rammefortøyningen og ettpunktsforankringen. På  $x$ -aksen presenteres frekvensen og på  $y$ -aksen illustreres spektral bølgeenergi. I Figur 57 og 58 blir det observert JONSWAP-bølgene JS2510 og JS2512 og hvert deres teoretiske JONSWAP-spekter for rammefortøyningen og ettpunktsforankringen. Det observeres at begge bølgene er lik hver av deres teoretiske JONSWAP-spekter. Selv om dataene ser støyete ut, er energien i signalet likt. Dette måles også med RMSE for rammefortøyningen, som blir illustrert i Tabell 12 fra kapittel 3.4.2.





Figur 57: Bølgespekteret til de to JONSWAP-bølgene JS2510 og JS2512 med hvert deres teoretiske JONSWAP-bølgespekter til rammefortøyningen.

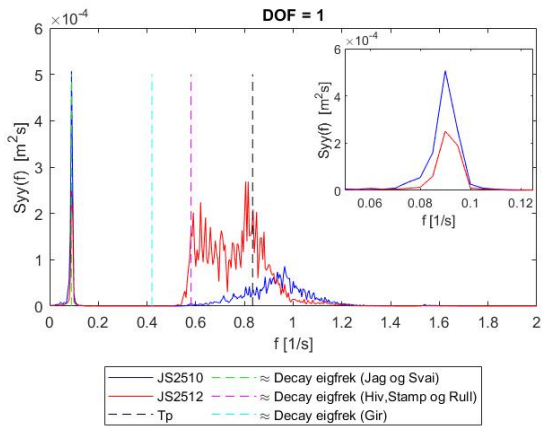


Figur 58: Bølgespekteret til de to JONSWAP-bølgene JS2510 og JS2512 med hvert deres teoretiske JONSWAP-bølgespekter til ettpunktsforankringen.

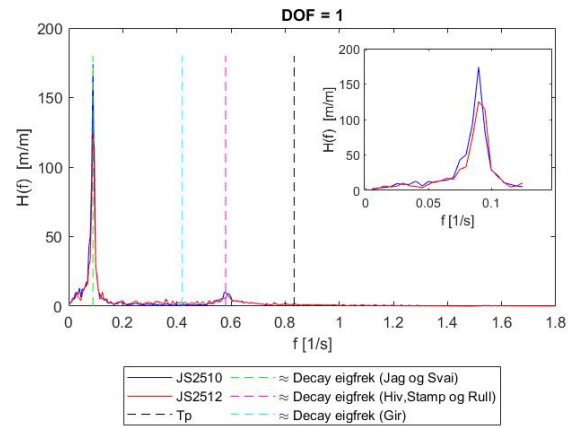
### 4.3.2 Resultater av JONSWAP-bølgene - rammefortøyning

I Figur 59-66 blir de irregulære bølgene JS2510 og JS2512 med de ulike frihetsgradene presentert. Hver av plottene inneholder egenfrekvensen til de ulike frihetsgradene. Det er også lagt inn  $T_p$  for å se hvor på grafen toppunktene treffer. Responsspektrene kan være ulik fra de to bølgene og dette blir godt illustrert i disse frihetsgradene. Fra de ulike RAO-spektrene er det observert at bølgene for de valgte frihetsgradene er veldig lik. Eneste forskjellen i RAO er i Figur 64 og 66 for frihetsgraden stamp og rull, der energien ser ut til å ha en ulik variasjon. Dette kan eventuelt komme av forstyrrelser som oppstår fra tankveggen, der bølgene blir reflektert tilbake til modellen.

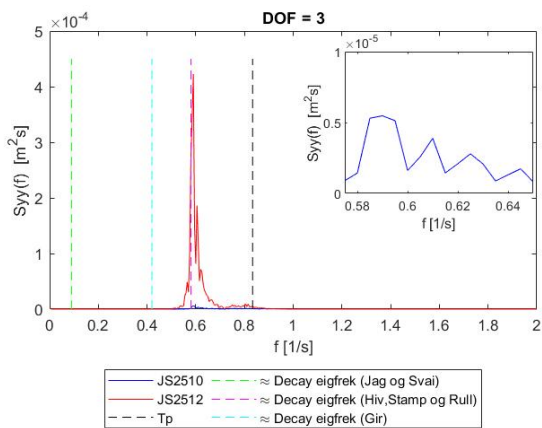
I Figur 61 viser det i responspekteret for frihetsgraden hiv at JS2510-bølgen har en minimal respons ved egenfrekvensen til hiv, stamp og rull. Dette er på grunn av at størrelsen til JS2512-bølgen er mye større enn den andre. Dette kan komme av at JS2510 har sin  $T_p$  nærmere egenfrekvensen enn JS2512, og dette kan trigge egenfrekvensen til JS2510, og deretter skape større eigensvingninger.



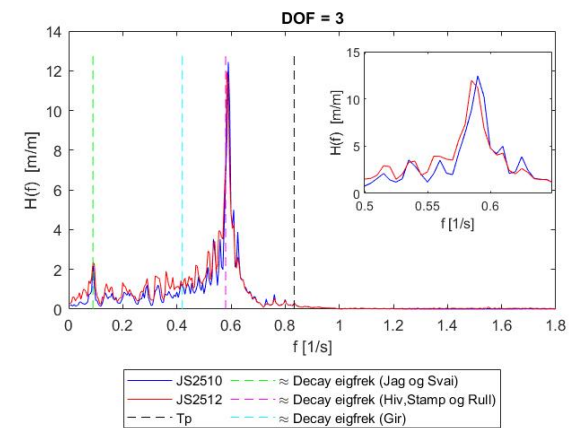
Figur 59: Responsspekteret i frihetsgraden jag for rammefortøyningen.



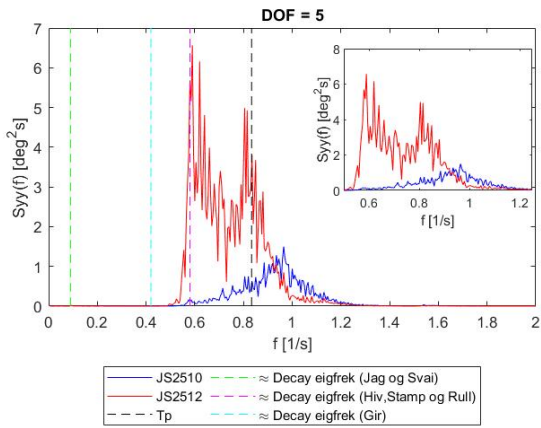
Figur 60: RAO til frihetsgraden jag for rammefortøyningen.



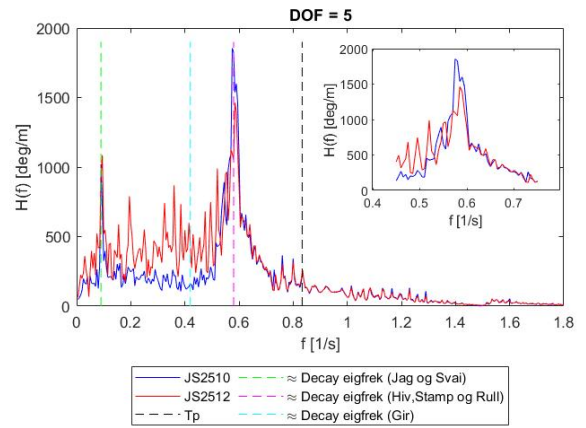
Figur 61: Responsspekteret i frihetsgraden hiv for rammefortøyningen.



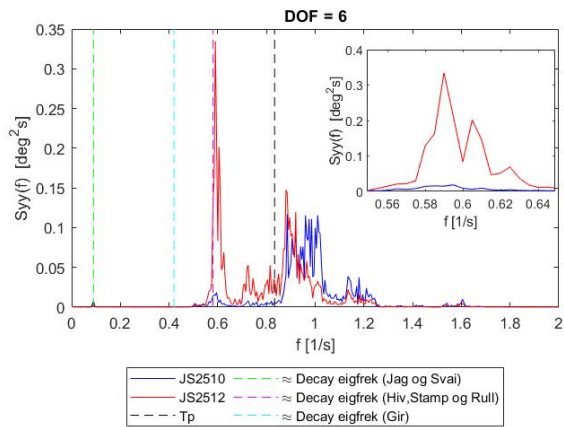
Figur 62: RAO til frihetsgraden hiv for rammefortøyningen.



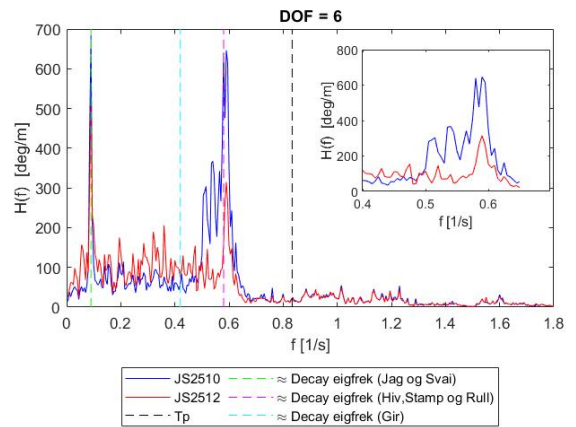
Figur 63: Resonansspekteret i frihetsgraden stamp for rammefortøyningen.



Figur 64: RAO til frihetsgraden stamp for rammefortøyningen.



Figur 65: Resonansspekteret i frihetsgraden rull for rammefortøyningen.



Figur 66: RAO til frihetsgraden rull for rammefortøyningen.

### 4.3.3 Resultater av JONSWAP-bølgene - ettpunktsforankring

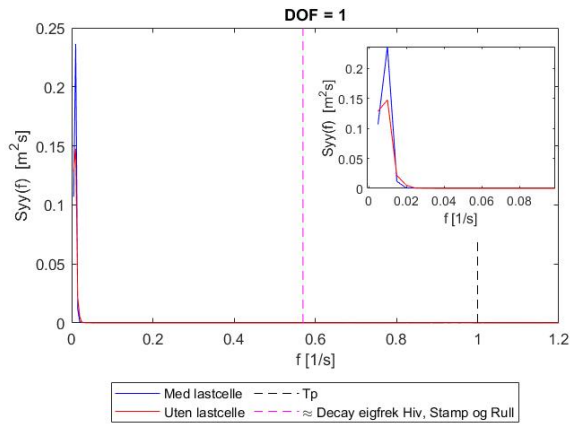
For ettpunktsforankringen er det utført fire repetisjoner, der to av repetisjonene er med lastceller. Den tredje repetisjonen er uten lastceller og den siste repetisjonen har Egget<sup>®</sup> et lokk på seg og er uten lastceller. Fra white noise-testene ble det utført tre repetisjoner, der to repetisjoner er med lastceller og den siste er uten, men med lokk. Det er tatt utgangspunkt for frihetsgradene jag, hiv, stamp og rull for begge testene.

Det er valgt å bare ta med repetisjon en, som er med lastcelle på modellen og repetisjon nummer tre som er uten lastcelle for JONSWAP-bølgene. Dette er på grunn av store mengder repetisjoner og dataanalyser som er utført. Samtidig er det interessant å se om ledningene som var festet til lastcellene har en påvirkning på bevegelsen til Egget<sup>®</sup>.

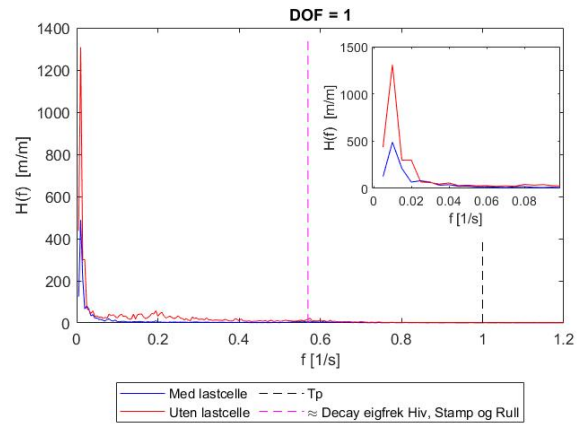
#### JONSWAP med- og uten lastcelle

De første JONSWAP-testene som blir presentert er fra repetisjon nummer en, med lastcellene på modellen og nummer tre som er uten lastcelle for JONSWAP-bølgen JS2510. Det er også tatt med  $T_p$  og egenfrekvensen til hiv, stamp og rull som er slått sammen. I RAO-spektrene til Figur 70, 72 og 74 for frihetsgraden til hiv, stamp og rull blir det observert at egenfrekvensen er nærværende ved nesten alle toppunktene. Responsspektrene ( $S_{yy}(f)$ ) viser en forskjell i energinivået mellom de to bølgene til alle frihetsgradene. Derimot er RAO-spektrene ( $H(f)$ ) veldig lik for de to bølgene.

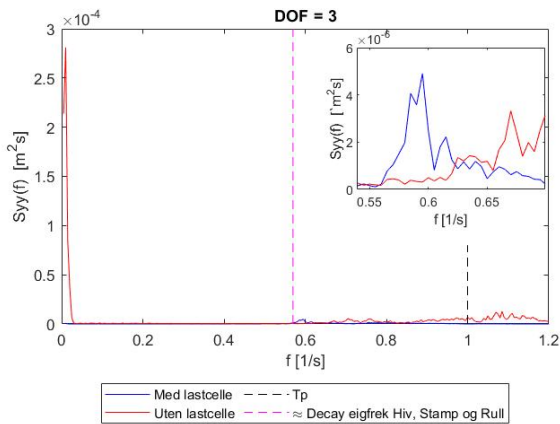
Repetisjon nummer tre er uten lastceller, og som det blir illustrert for Figur 69-74 så observeres det at det er en litt mer respons uten lastceller, enn det er med lastceller. Grunnen til dette kan komme av ledningene til lastcellene påvirker den naturlige bevegelsen til modellen. I denne repetisjonen blir det observert at egenfrekvensen til hiv, stamp og rull ikke går i toppunktene, men ligger heller litt utenfor. I Figur 72 og 74 viser resultatene mye støy når det gjennomføres repetisjonen uten lastcelle. Grunnen til dette kan være numerisk, for ideelt sett skulle RAO gått mot null.



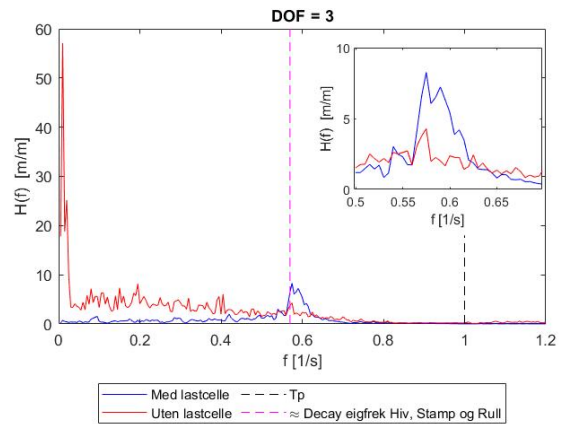
Figur 67: Resonsspekteret til JONSWAP-bølgen JS2510 i frihetsgraden jag med- og uten lastcelle for ettpunktsforankringen.



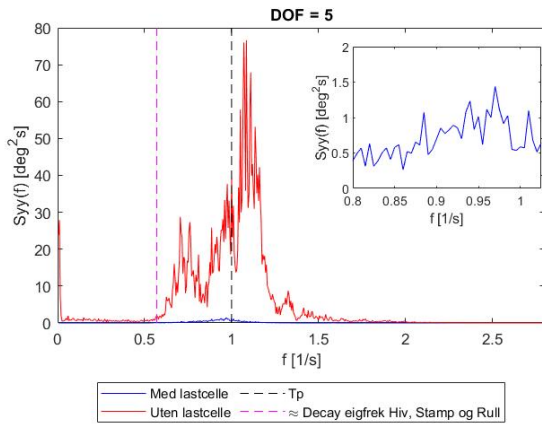
Figur 68: RAO til JONSWAP-bølgen JS2510 med frihetsgraden jag med- og uten lastcelle for ettpunktsforankringen.



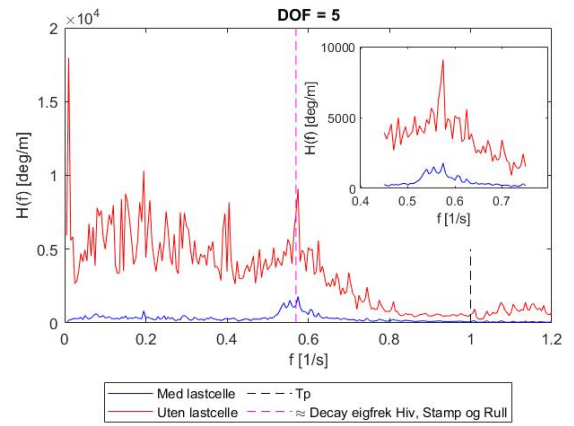
Figur 69: Resonsspekteret til JONSWAP-bølgen JS2510 i frihetsgraden hiv med- og uten lastcelle for ettpunktsforankringen.



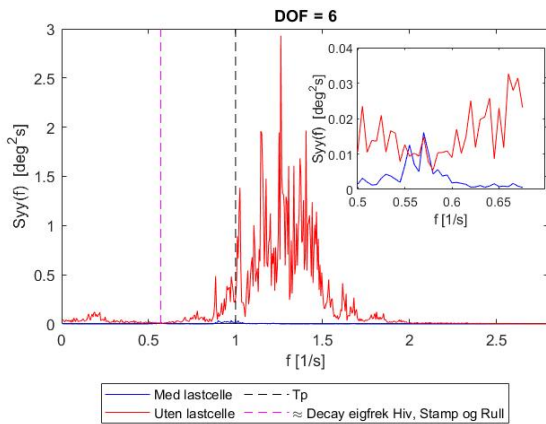
Figur 70: RAO til JONSWAP-bølgen JS2510 med frihetsgraden hiv med- og uten lastcelle for ettpunktsforankringen.



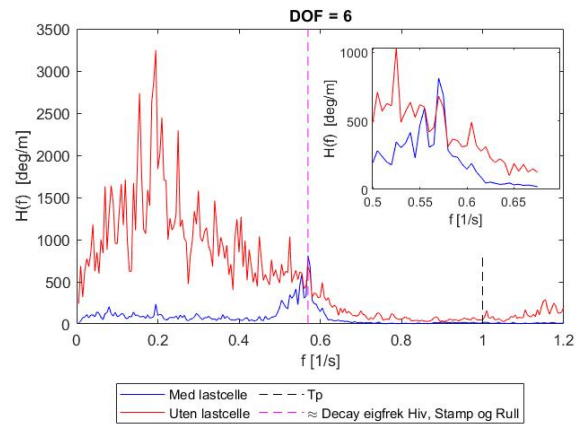
Figur 71: Resonsspekteret til JONSWAP-bølgen JS2510 i frihetsgraden stamp med- og uten lastcelle for ettpunktsforankringen.



Figur 72: RAO til JONSWAP-bølgen JS2510 med frihetsgraden stamp med- og uten lastcelle for ettpunktsforankringen.



Figur 73: Resonsspekteret til JONSWAP-bølgen JS2510 i frihetsgraden rull med- og uten lastcelle for ettpunktsforankringen.

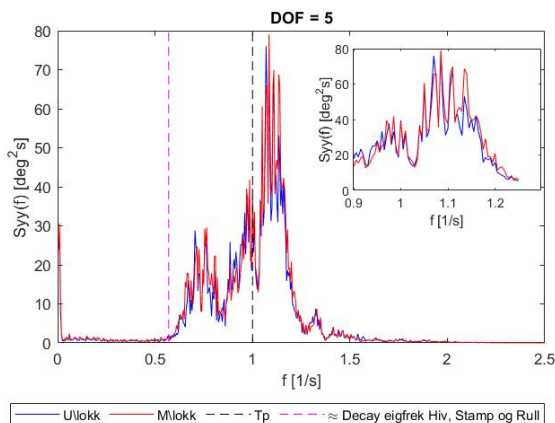


Figur 74: RAO til JONSWAP-bølgen JS2510 med frihetsgraden rull med- og uten lastcelle for ettpunktsforankringen.

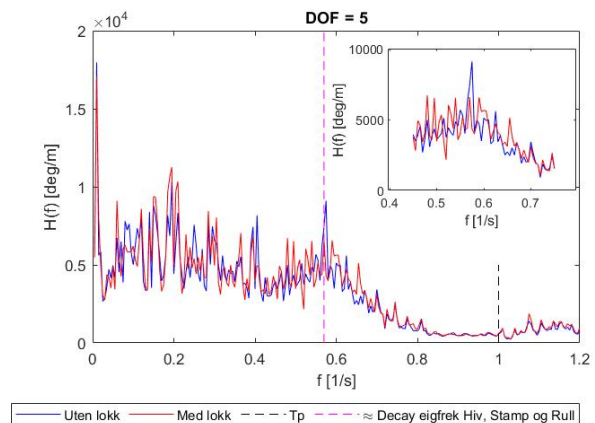
## JONSWAP der Egget<sup>®</sup> er uten- og med lokk

Resultatene er hentet fra JONSWAP-bølgene, JS2510 og JS2512. Der skal Egget<sup>®</sup> sammenlignes med repetisjon nummer tre som er uten lokk, og repetisjon nummer fire som er med lokk. Begge repetisjonene er uten lastcelle. Det er bare tatt hensyn til frihetsgraden stamp for begge bølgene og repetisjonene. Fra responsspekteret ( $S_{yy}(f)$ ) som vises i Figurene 75 og 77 observeres det at JS2510 og JS2512 er tilnærmet speilvendt. Toppunktet i Figur 75 for bølgen JS2510 er litt over 1 Hz og går forbi  $T_p$ , mens i Figur 77 for bølgen JS2512 er toppunktet på rundt 0.8 Hz og er litt før  $T_p$ . Dette kan komme av at Egget<sup>®</sup> blir påvirket av  $T_p$  til bølgene og jo høyere den er, jo mer vil den gå mot egenfrekvensen til Egget<sup>®</sup> i frihetsgraden hiv, stamp og rull. Det blir også observert i begge figurene at bølgene i repetisjonen med lokk har høyere toppunkt, enn repetisjonen uten lokk.

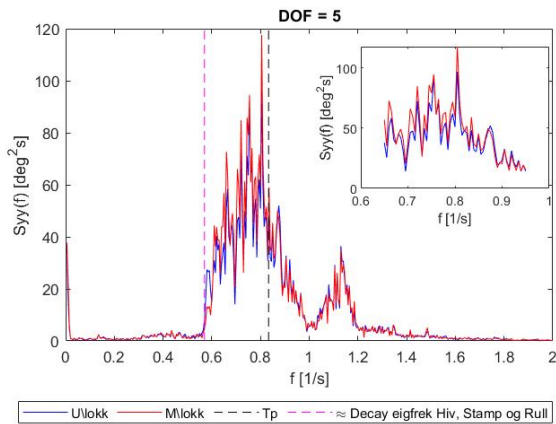
For RAO-spekteret ( $H(f)$ ) observeres det i Figur 76 høyere toppunkt helt i starten for repetisjonen med lokk. Dette skjer ikke i RAO-spekteret for bølgen JS2512. Der er toppunktet for repetisjonen med lokk litt lengre ut i spekteret. For begge figurene observeres det at repetisjonen med lokk har noe høyere toppunkt, enn repetisjonen uten lokk. Dette kan tyde på at repetisjonen med lokk har hatt en minimal effekt på responsen og bølgebevegelsen til Egget<sup>®</sup>. Ellers er det samsvar i repetisjonene.



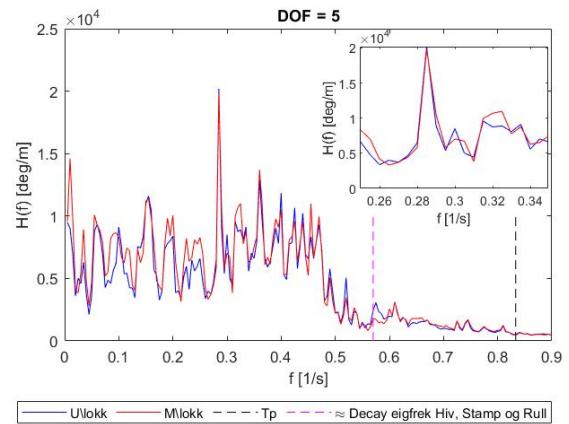
Figur 75: Responsspekteret til den irregulære bølgen JS2510 i frihetsgraden stamp for Egget<sup>®</sup> uten- og med lokk for ettpunktsforankringen.



Figur 76: RAO til den irregulære bølgen JS2510 i frihetsgraden stamp for Egget<sup>®</sup> uten- og med lokk for ettpunktsforankringen.



Figur 77: Resonsspekteret til den irregulære bølgen JS2512 i frihetsgraden stamp for Egget<sup>®</sup> uten- og med lokk for ettpunktsforankringen.



Figur 78: RAO til den irregulære bølgen JS2512 i frihetsgraden stamp for Egget<sup>®</sup> uten- og med lokk for ettpunktsforankringen.

#### 4.3.4 Lastcelledata

Lastcellene ble bare brukt til oppsett nummer to med ettpunktsforankring. Fra oppsettet ble det bare utført to repetisjoner med lastcellene på Egget<sup>®</sup>. I denne delen av resultater blir det sett på en del der den filtrerte lastcelledataen sammenlignes med data fra Qualisys. Dette ble utført for å kunne se på hvordan kraften fra fortøyningslinene påvirker bevegelsen til systemet. For å se om lastcelledataen er pålitelig, og repeterbar er det viktig å se om det er en sammenheng mellom den filtrerte lastcelledataen og data fra Qualisys. Det er ikke en del av oppgaven å se på faseforskyvningen til lastcelledataen. Dette på grunn av at det krever en systemanalyse av datainnsamlingen. Den andre delen blir det sett på respons- og RAO-spekteret til lastcelledataen.

De to JONSWAP-bølgene er JS2510, og JS2512. Lastcellene som ble analysert er lastcelle 0 og lastcelle 1. Siden lastcellene var neddykket og ikke tåler vann, kan noen av målingene ha en viss usikkerhet. Lastcelle 1 måtte bli byttet ut etter første runde med kjøring. Så repetisjon en er med den første lastcelle 1 og den andre repetisjonen er med en ny lastcelle 1. I Figurene 79 - 84 blir lastcelledataen for lastcelle 0 og lastcelle 1 presentert for første repetisjon. Figurene viser til lastcelle 0 sett mot lastcelle 1 i forhold til de ulike frihetsgradene og JONSWAP-bølgene.

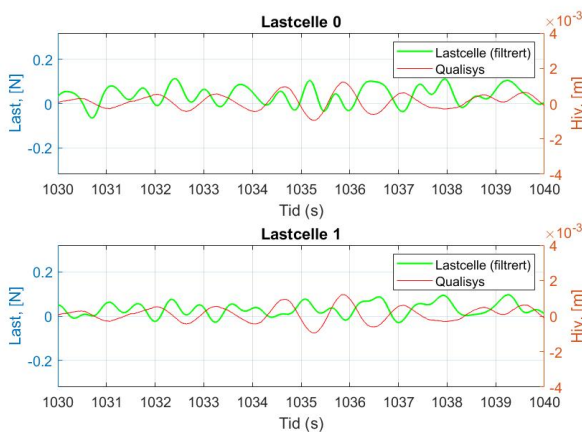


Tabell 15 presenterer avlest min- og max last i newton for hver lastcelle og for hver JONSWAP-bølge. Den er lik for alle frihetsgradene. Observasjonen tilsier at bølgen JS2510 har høyest max last for lastcelle 0, og høyest min last for JS2512 for lastcelle 1. I samme tabell blir det også beregnet frekvens i  $Hz$  presentert for alle frihetsgradene, og for hver JONSWAP-bølge. Måten den frekvensen er beregnet på, er antall bølgetopper delt på tidsenhet. Der er antall bølgetopper telt fra tidsenheten 1031 sekunder til 1036 sekunder for alle figurene.

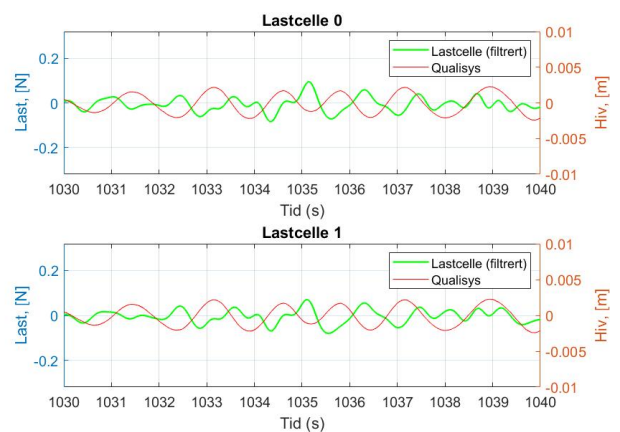
### JS2510 og JS2512 - Hiv

I Figur 79 og 80 blir lastcelledataen presentert i frihetsgraden hiv, for de to JONSWAP-bølgene. Det observeres at kurven fra Qualisys, spesielt for JONSWAP-bølgen JS2512 går opp når lastcelledataen går ned. Dette kan oppstå på grunn av faseforskyvning. For bølgen JS2510 blir det observert at den filtrerte lastcelledataen viser at lastcelle 0 har høyere- og lavere verdier enn lastcelle 1. Dette kan komme av at de enten er neddykket i vann, noe som kan gi forstyrrelser, eller elektrisk støy fra bølgetanken.

I Tabell 15 observeres det at frekvensen ligger på 0.8 Hz for begge lastcellene og bølgene. Siden utsnittet av dataene er begrenset, er det ikke et helhetlig bilde, men viser til hvor mange ganger systemet samler inn data i sekundet. Det blir observert noen overlapper mellom lastcelledata og data fra Qualisys.



Figur 79: Lastcelle 0 og lastcelle 1 i frihetsgraden hiv for JONSWAP-bølgen JS2510.

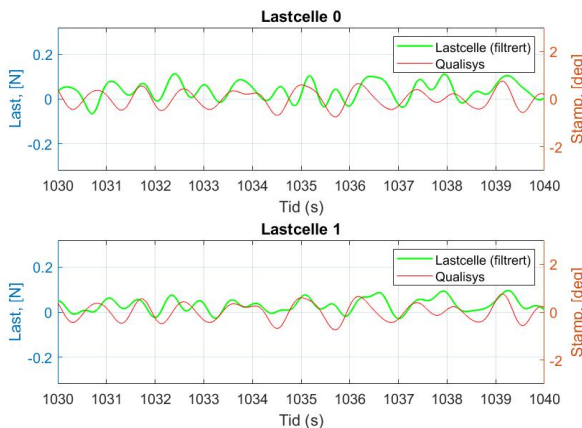


Figur 80: Lastcelle 0 og lastcelle 1 i frihetsgraden hiv for JONSWAP-bølgen JS2512.

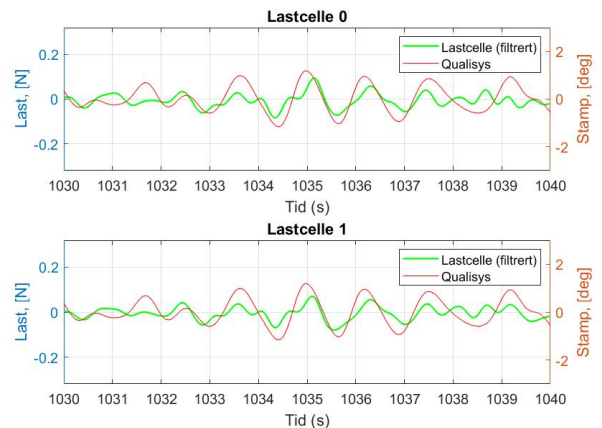
## JS2510 og JS2512 - Stamp

I Figur 81 og 82 blir det illustrert lastcelledata og data fra Qualisys for frihetsgraden stamp, for de to JONSWAP-bølgene. Det observeres i Figur 82 for bølgen JS2512 at grafen fra Qualisys har en svingning som går i takt med den filtrerte lastcelledataen. Ved å se på Figur 82, og ved å se på tidsserien som går fra 1033 sekunder til 1037 sekunder, så observeres det en bølge som har en overlappet svingning. Dette kan komme av at det er to bølger med ulike frekvenser som overlapper hverandre. Dette kan oppstå på grunn av refleksjon av en bølge som treffer tankveggen.

En annen observasjon er at data fra Qualisys følger den filtrerte lastcelledataen med svingningene sine. Dette betyr at det er en repeterbar fase mellom disse to målingene, og svingningen til den filtrerte lastcelledataen følger svingningen til Qualisys. Dette er positivt med tanke på at det sier noe om nøyaktigheten og påliteligheten til testene. I Tabell 15 er den beregnede frekvensen rundt 1 Hz for lastcelle 0 og 0.8 Hz for lastcelle 1. Bølgen JS2510 har flere bølgetopper i et kortere tidsintervall enn bølgen JS2512. Dette kan komme av interferens med andre bølger, eller refleksjoner fra tankveggen.



Figur 81: Lastcelle 0 og lastcelle 1 i frihetsgraden stamp for JONSWAP-bølgen JS2510.

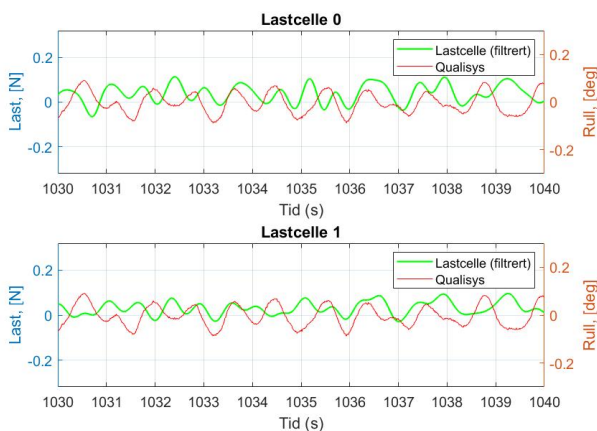


Figur 82: Lastcelle 0 og lastcelle 1 i frihetsgraden stamp for JONSWAP-bølgen JS2512.

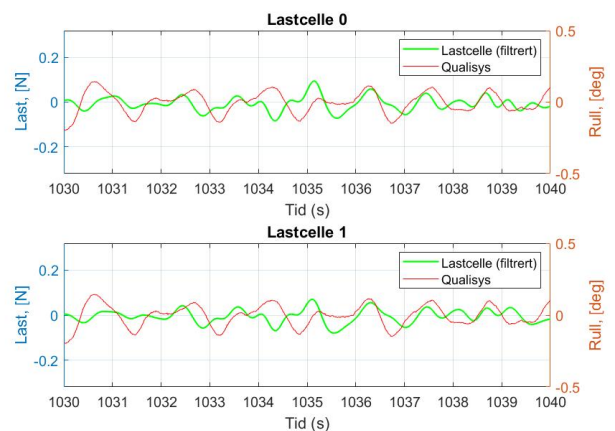
## JS2510 og JS2512 - Rull

I Figur 83 og 84 blir lastcelledata for frihetsgraden rull presentert for de to JONSWAP-bølgene. I disse to figurene observeres det at det er flere kortere bevegelser for JS2510, enn for JS2512. I Figur 84 blir det observert overlagrede svingninger i data fra Qualisys, som gir doble bølgetopper i en bølgetopp. Siden rull er en rotasjon rundt  $x$ -aksen vil denne overlagrede svingningen mest sannsynlig ikke ha oppstandelse for refleksjon fra denne spesifikke frihetsgraden. Det kan alltid oppstå ved at Egget<sup>®</sup> roterer i en annen frihetsgrad samtidig som rull, og skaper derav bølger som igjen vil skape refleksjoner i tankveggen.

Observasjonene om fasene til de to data-settene i Figur 83 og 84 er nesten like tydelig for rull, som for stamp. Deler av svingningene deler en repeterbar fase, men ikke alle.



Figur 83: Lastcelle 0 og lastcelle 1 i frihetsgraden rull for JONSWAP-bølgen JS2510.



Figur 84: Lastcelle 0 og lastcelle 1 i frihetsgraden rull for JONSWAP-bølgen JS2512.

Tabell 15 gir et begrenset syn på min- og max last, men er med hensyn til at svingningene skal bli bedre studert. Min- og max lasten forteller at det er ikke store avvikene mellom de ulike lastcellene, for de ulike bølgene. Lastcelle 0 for bølgen JS2512 har den laveste min-verdien og lastcelle 1 for JS2512 har den høyeste max-verdien. En av grunnen til at lastcelle 1 har den høyeste max-verdien kan være på grunn av at den ga dårlige verdier, og den ble byttet ut etter denne repetisjonen. Det er også beregnet en middelvei for min- og max last, der det blir observert at middelveien er høyest for bølgen JS2512 for lastcelle 0. De beregnede frekvensene for de ulike frihetsgradene avviker ikke mye fra hverandre. Rull har den høyeste frekvensen, og hiv har den laveste. Dette kan komme av at rull er en frihetsgrad som kan bli påvirket av andre frihetsgrader og kan bli påvirket av refleksjoner fra tankveggene.

Tabell 15: Oversikt over avlest min- og max last, middelvei og beregnet frekvens over lastcelledata for de to JONSWAP-bølgene JS2510 og JS2512.

Lastcelle	Bølge	Avlest last [N]			Beregnet frekvens [Hz]		
		Min	Max	Middelvei	Hiv	Stamp	Rull
0	JS2510	-0.08	0.12	0.02	0.80	1.00	1.20
0	JS2512	-0.03	0.90	0.43	0.80	1.00	1.20
1	JS2510	-0.09	0.80	0.35	0.80	0.80	1.20
1	JS2512	-0.10	0.70	0.30	0.80	0.80	1.20

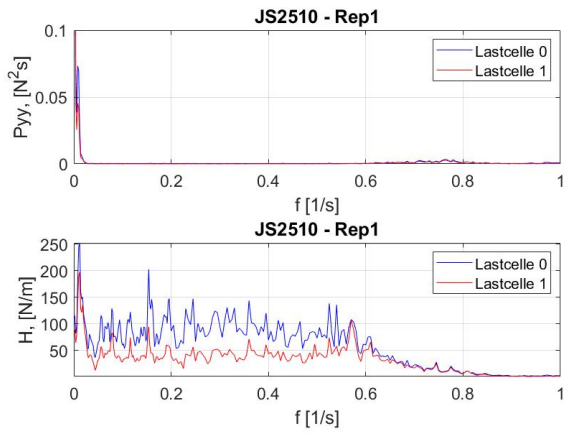
### Respons- og RAO-spekter til lastcelledata

Figurene 85 - 88 viser frekvensen til lastcelledataen i form av lastresponspekter ( $P_{yy}(f)$ ) og RAO-spekteret ( $H(f)$ ). Spektrene vil gi en bedre forståelse for hvordan forankringsoppsettet vil oppføre seg i forhold til de ytre kreftene som ble påført. De ytre kreftene er JONSWAP-bølgene JS2510 og JS2512. Figurene 85 - 88 viser til de to spektrene for bølgene JS2510 og JS2512, for repetisjon en og to for de irregulære bølgene. Grunnen til at begge repetisjonene er tatt med, er for å undersøke om byttingen av lastcelle 1 påvirker resultatene.

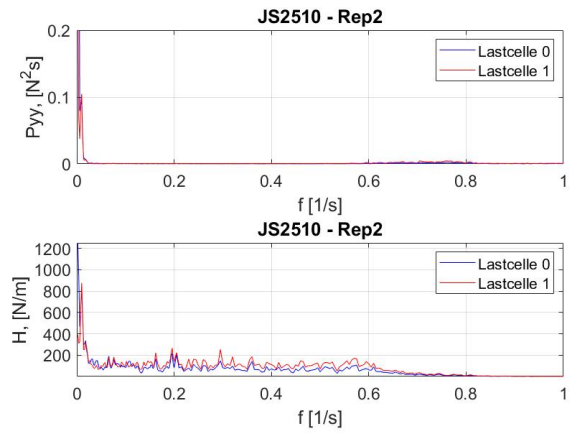
I Figur 85 og 87 illustreres JS2510 og JS2512 for repetisjon en. Fra lastresponspekteret ( $P_{yy}(f)$ ) er kurvene like, men forskjellig fra størrelsen. Fra RAO-spekteret ( $H(f)$ ) er forskjellen på disse to at lastcelle 0 for JS2512 har et høyere toppunkt, mens for JS2510 har lastcelle 0 et mer bredt spekter av høyere toppunkter. Lastcelle 1 derimot har høye toppunkter på JS2512, enn JS2510. Dette vil da stemme siden JS2512 har en høyere  $T_p$  enn JS2510 og vil dermed påvirke lastcellen mer.

I Figur 88 for responspekteret ( $P_{yy}(f)$ ) oppstår det frekvenser rundt 0.6 Hz til 0.8 Hz. Det er rundt der egenfrekvensen til hiv, stamp og rull befinner seg. For ( $H(f)$ )-spekteret er dataene tilnærmet lik, men rundt 0.3 Hz vil lastcelle 1 ha litt høyere toppunkt enn lastcelle 0.

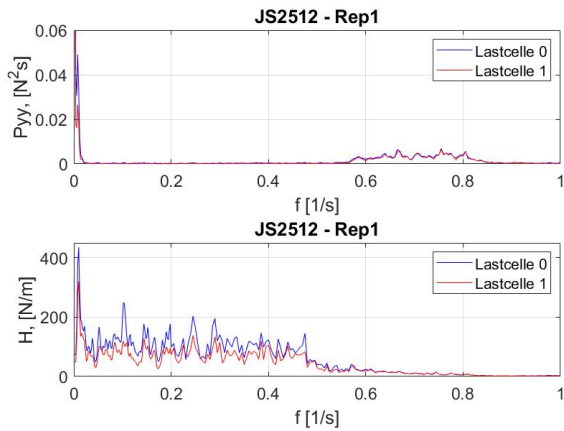
I alle figurene blir det observert for repetisjon to mindre støynivå enn for repetisjon en. Dette spesielt for lastcelle 1, som kan komme av at den ble byttet ut. Det blir også illustrert at i lastcelledataene har alle et toppunkt rundt der egenfrekvensen til jag ligger, som er på rundt 0.09 Hz. Dette kan si noe om at lastcellen responderer til modellens respons.



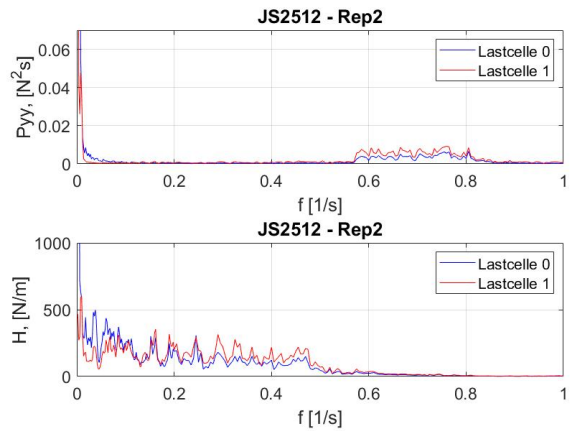
Figur 85: Respons- og RAO spekteret for lastcelle 0 og lastcelle 1 fra bølgen JS2510, repetisjon en.



Figur 86: Respons- og RAO spekteret for lastcelle 0 og lastcelle 1 fra bølgen JS2510, repetisjon to.



Figur 87: Respons- og RAO spekteret for lastcelle 0 og lastcelle 1 fra bølgen JS2512, repetisjon en.



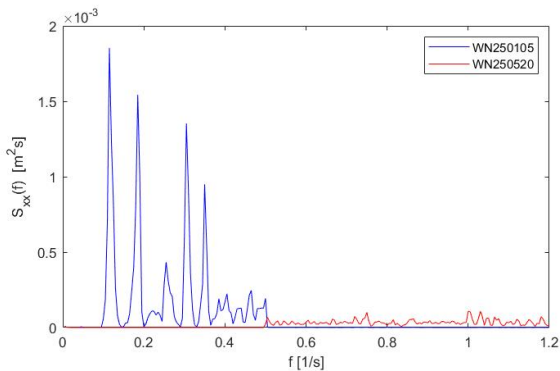
Figur 88: Respons- og RAO spekteret for lastcelle 0 og lastcelle 1 fra bølgen JS2512, repetisjon to.

### 4.3.5 White noise

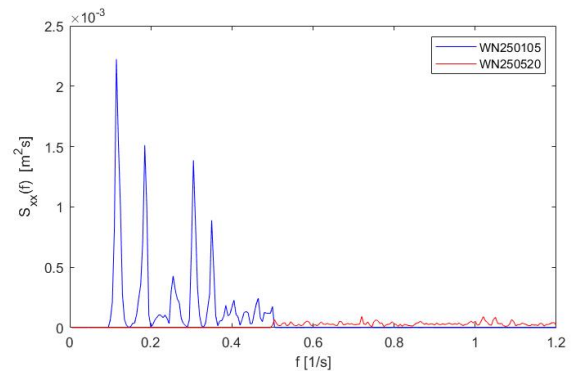
I denne delen av de irregulære bølgene vil white noise-bølgene bli presentert for begge oppsettene. De to white noise-bølgene som er blitt testet ut er WN250105 og WN250520. Der blir testene analyser i form av bølgespekter ( $S_{xx}(f)$ ), responspekter ( $S_{yy}(f)$ ) og RAO-spekter ( $H(f)$ ). Frihetsgradene som er tatt hensyn til er jag, hiv, stamp og rull.

#### White noise - bølgespekter

I Figur 89 og 90 blir bølgespekteret ( $S_{xx}(f)$ ) til rammefortøyningen og ettpunktsforankringen presentert. Der de to white noise-bølgene WN250105 og WN250520 blir illustrert opp mot hverandre. Det observeres at WN250105 har høyere toppunkter enn WN250520, selv om WN250105 ligger på et lavere frekvensplan. WN250520 brer seg over et større frekvensplan, men med mye mindre toppunkter enn WN250105. Dette kan komme av at white noise-bølger har en jevn energi som brer seg over frekvensene, som kan resultere i at toppunktene kan opptre tilfeldig, uavhengig av bølgen. Forskjellen mellom disse to figurene er høyden på toppunktene.



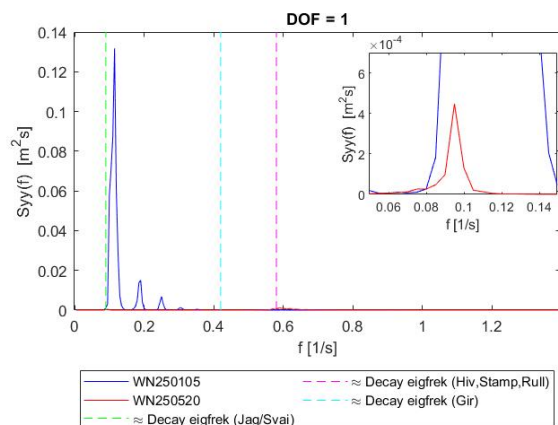
Figur 89: Bølgespekter for white noise-bølgene fra rammefortøyningen med bølgene WN250105 og WN250520.



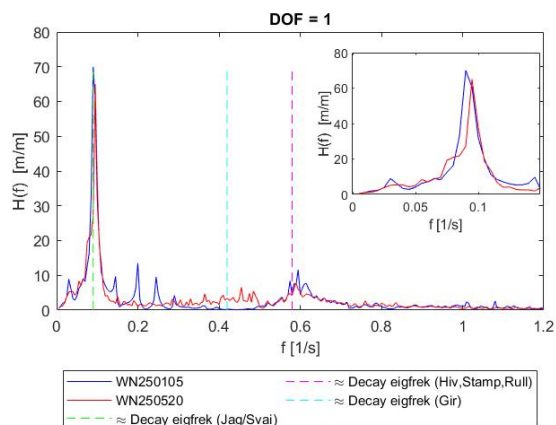
Figur 90: Bølgespekter for white noise-bølgene fra ettpunktsforankringen med bølgene WN250105 og WN250520.

## White noise - Rammefortøyning

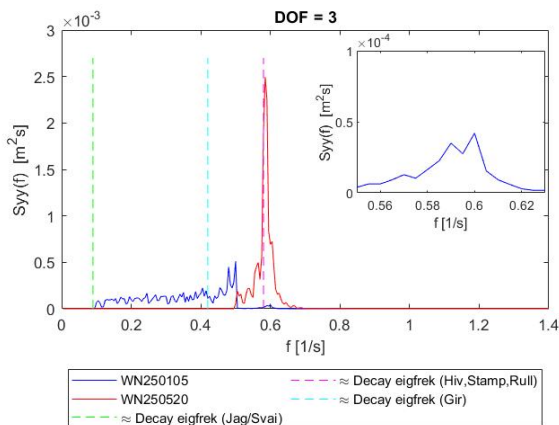
Figurene 91 - 98 viser til respons- og RAO-spekterene for de to white noise-bølgene for rammefortøyningen. Det blir observert toppunkter i alle RAO-spektrene til hver frihetsgrad med tilhørende egenfrekvens. Det er store likheter mellom de to bølgene fra RAO-spekteret til frihetsgradene jag, hiv og stamp. Det er dermed en ulikhet i frihetsgraden rull. Ulikheten kan oppstå av egenbevegelsen til Egget<sup>®</sup>, og dette kan ha skapt refleksjoner av bølger. Det observeres også at bølgen WN250105 har høyere toppunkter enn bølgen WN250520 i frihetsgraden jag. Dette kan komme av at WN250105 nærmer seg egenfrekvensen i jag, og vil påvirke egenbevegelsen til Egget<sup>®</sup> mer enn WN250520.



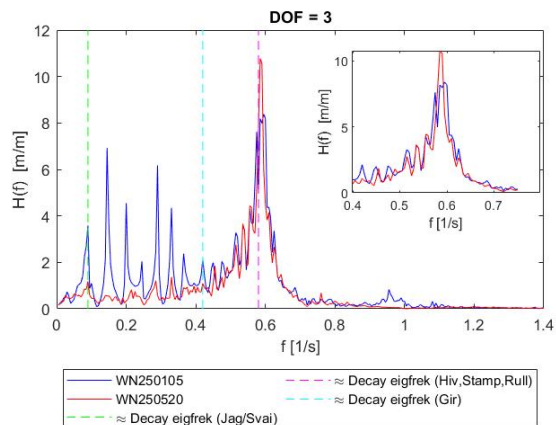
Figur 91: Resonansspekteret til white noise-bølgene i frihetsgraden jag for rammefortøyningen.



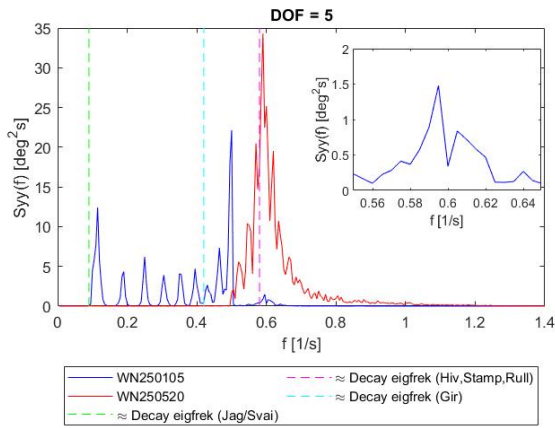
Figur 92: RAO-spekteret til white noise-bølgene i frihetsgraden jag for rammefortøyningen.



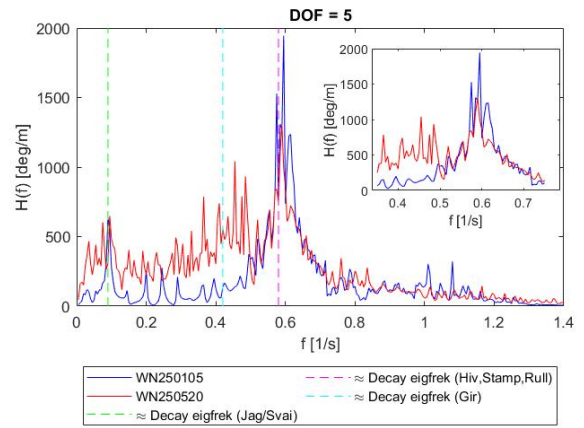
Figur 93: Resonansspekteret til white noise-bølgene i frihetsgraden hiv for rammefortøyningen.



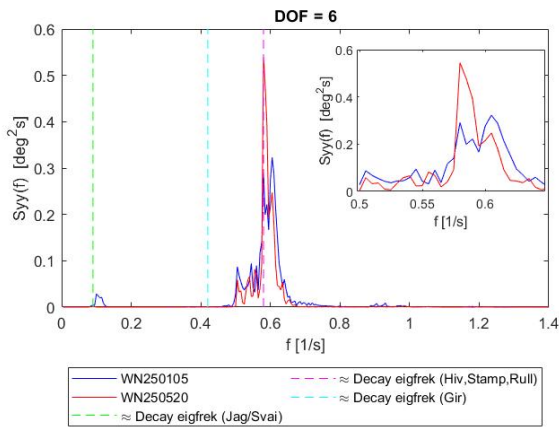
Figur 94: RAO-spekteret til white noise-bølgene i frihetsgraden hiv for rammefortøyningen.



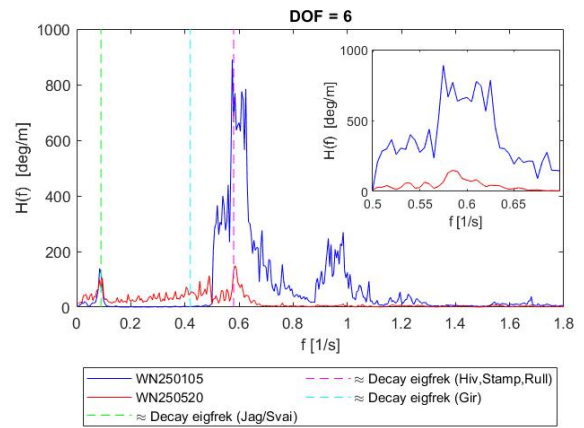
Figur 95: Responsspekteret til white noise-bølgene i frihetsgraden stamp for rammeførtøyningen.



Figur 96: RAO-spekteret til white noise-bølgene i frihetsgraden stamp for rammeførtøyningen.



Figur 97: Responsspekteret til white noise-bølgene i frihetsgraden rull for rammeførtøyningen.

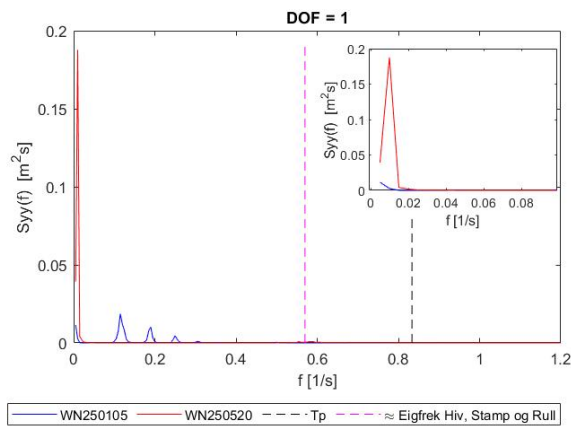


Figur 98: RAO-spekteret til white noise-bølgene i frihetsgraden rull for rammeførtøyningen.

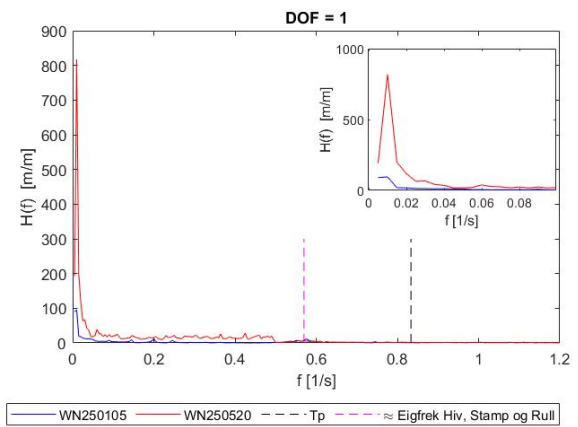


## White noise - Ettpunktsforankring

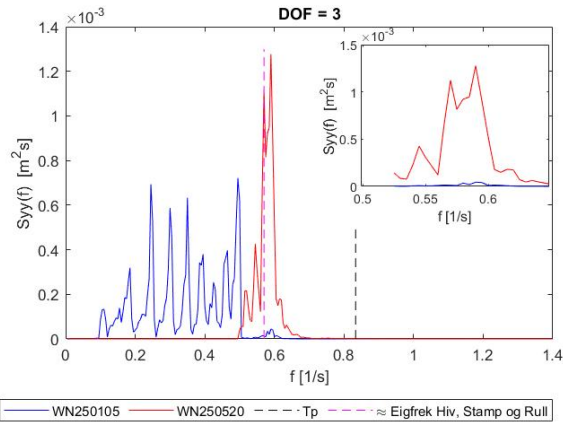
Fra disse resultatene er det bare valgt å ta med white noise-resultater fra repetisjon en, med lastceller. Her er det også tatt med  $T_p$  og egenfrekvensen til hiv, stamp og rull. Fra responspekteret ( $S_{yy}(f)$ ) blir det observert at bølgen WN250520 i Figur 99 og 101 har mye høyere toppunkt enn bølgen WN250105 i frihetsgradene jag og hiv. I Figur 103 og 105 dominerer bølgen WN250105 på høyest toppunkt. For RAO-spekteret ( $H(f)$ ) i Figur 100 er WN250520 høyest på toppunkt på jag, men mindre enn WN250105 på de andre frihetsgradene. I frihetsgraden stamp, som blir observert i Figur 104 brer WN250520 seg over et større energilag enn WN250105, men har ingen markante toppunkt.



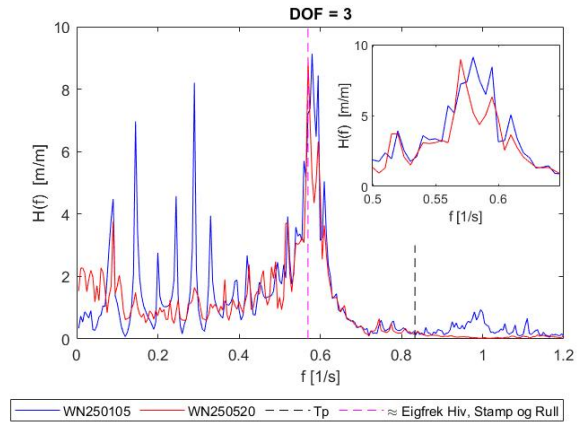
Figur 99: Responsspekteret til white noise-bølgen i frihetsgraden jag med lastcelle for ettpunktsforankringen.



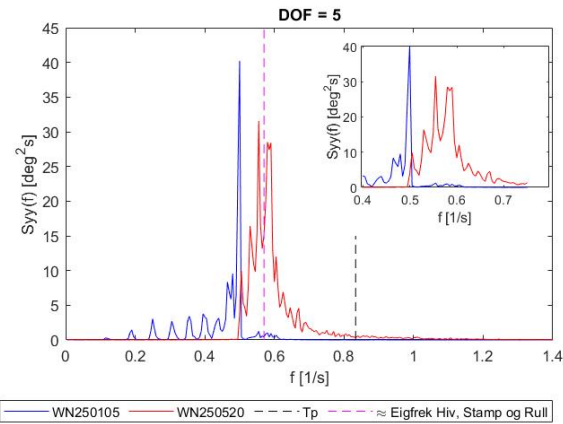
Figur 100: RAO-spekteret til white noise-bølgen i frihetsgraden jag med lastcelle for ettpunktsforankringen.



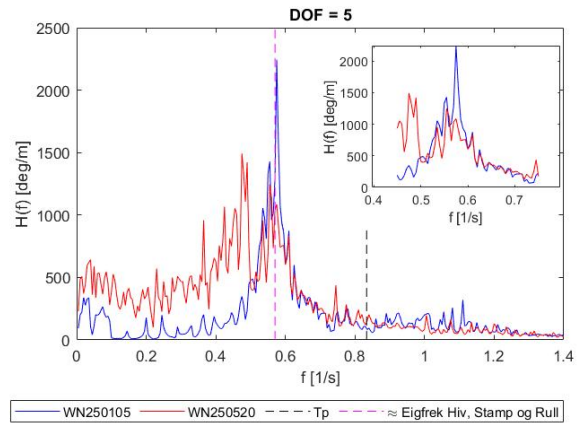
Figur 101: Resonsspekteret til white noise-bølgen i frihetsgraden hiv med lastcelle for ettpunktsforankringen.



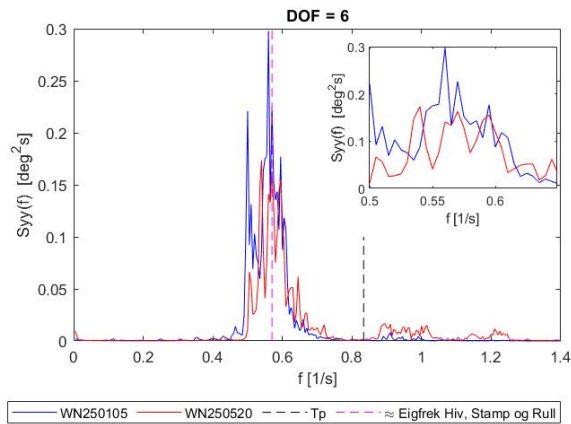
Figur 102: RAO-spekteret til white noise-bølgen i frihetsgraden hiv med lastcelle for ettpunktsforankringen.



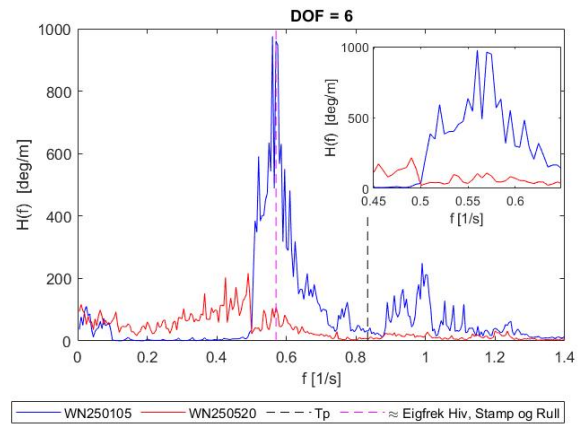
Figur 103: Resonsspekteret til white noise-bølgen i frihetsgraden stamp med lastcelle for ettpunktsforankringen .



Figur 104: RAO til white noise-bølgen i frihetsgraden stamp med lastcelle for ettpunktsforankringen .



Figur 105: Resonansspekteret til white noise-bølgen i frihetsgraden rull med lastcelle for ett-punktsforankringen.



Figur 106: RAO-spekteret til white noise-bølgen i frihetsgraden rull med lastcelle for ett-punktsforankringen.

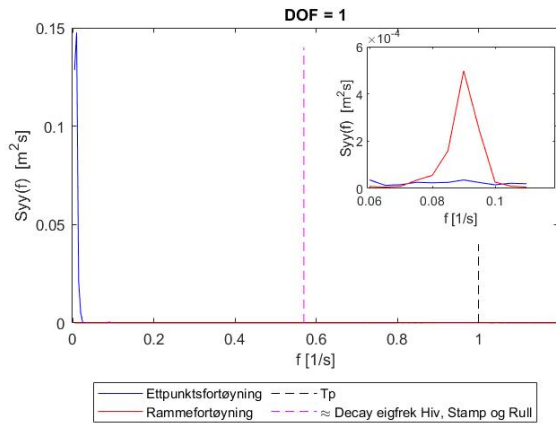
Det observeres i enkelte figurer, spesielt i Figur 101, høyere grad av støy. Støyet i bølgen WN250105 er illustrert med blå graf og viser flere markante topppunkter. En mulig årsak til dette kan være begrenset kalibrering av white noise-bølgen WN250105 for lavere frekvenser. Støy-fenomenet blir også observert i Figur 102 for bølgen WN250105. En annen mulig årsak til støy-fenomenet i frihetsgraden hiv kan være at systemets naturlige bevegelse samsvarer med bølgen som blir kjørt. Dette kan medføre økt energi, som vil implisere i moderate former for støy.

## 4.4 Sammenligning av begge oppsettene

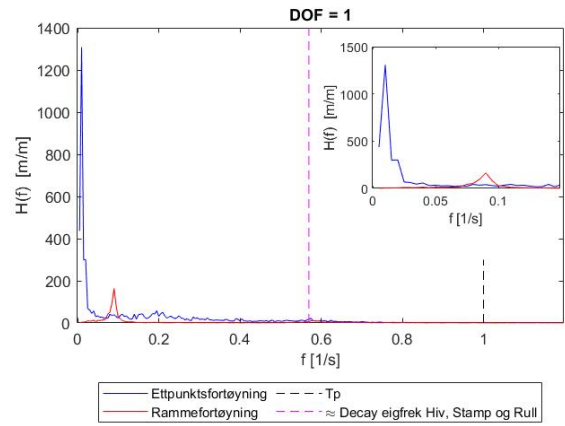
I denne delen av resultatene skal to av hovedresultatene sammenlignes. I den første delen skal rammefortøyning sammenlignes opp mot ettpunktsforankring. I den andre delen skal eksperimentelt data sammenlignes opp mot numerisk data. De numeriske dataene er gitt av den parallelle masteroppgaven [7]. De to oppsettene er analysert opp mot hverandre i form av responspektre ( $S_{yy}(f)$ ) og RAO-spekter ( $H(f)$ ). Sammenligningen mellom rammefortøyningen og ettpunktsforankringen blir bare presentert for JONSWAP-bølgene JS2510 og JS2512. For sammenligningen mellom eksperimentell- og numerisk data blir bare JONSWAP-bølgen JS2510 presentert. Frihetsgradene som er satt i fokus er jag, hiv, stamp og rull. Valget av frihetsgrader begrunnes med at de frihetsgradene gir de mest representative målingene.

### 4.4.1 Sammenligning av rammefortøyning og ettpunktsforankring

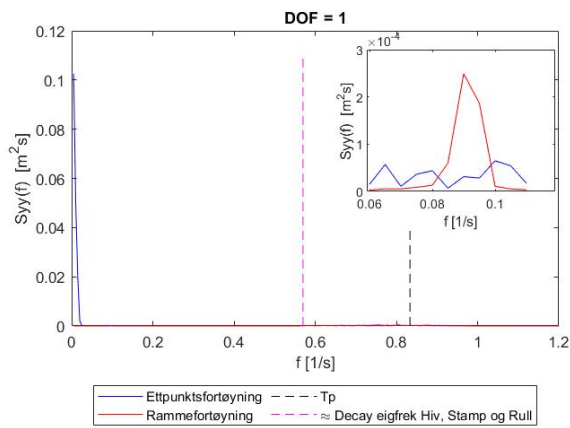
I Figurene 107 - 122 blir respons- og RAO-spektrene til de ulike frihetsgradene til JONSWAP-bølgene illustrert. Observasjonene tilsier at ettpunktsforankringen har en betydeligere høyere størrelse i begge spektrene, så det er noe utfordrende å se rammefortøyningens verdier ut fra disse figurene. Dette er forventet og samstemmer med hypotesen ettersom ettpunktsforankringen sitter mer løst, og kan skape større bevegelser. I tillegg er det bare egenfrekvensen til hiv, stamp og rull som er med, så det er vanskelig å se om enkelte toppunkter treffer for de andre frihetsgradene. En av grunnene til at ettpunktsforankringen får en høyere verdi, kan komme av påvirkning fra fenderen. I oppsettet til ettpunktsforankringen er den koblet til en fender med fortøyningslinene. Når bølgen treffer Egget<sup>®</sup> vil den få en bevegelse som vil trekke den bakover, samtidig som fenderen vil bli påvirket i samme retning. Så vil fenderen rette seg opp å dra Egget<sup>®</sup> med seg tilbake. Dette vil ha en påvirkning på egenbevegelsen til Egget<sup>®</sup>, og føre til at bevegelsene blir større i jag-retningen. Denne hendelsen blir illustrert i Figur 108. Videre blir det observert høyere toppunkter for bølgen JS2510, enn for bølgen JS2512 i ettpunktsforankringen.



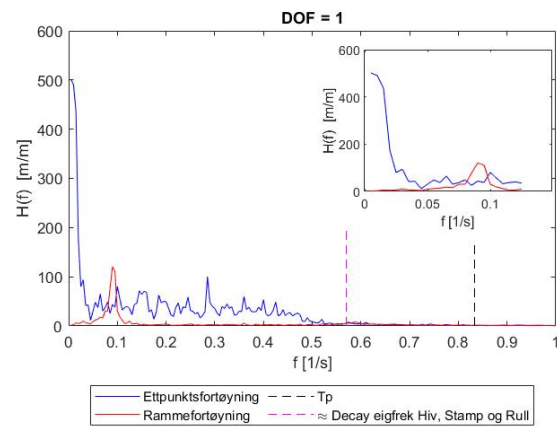
Figur 107: Resonansspekteret til den irregulære bølgen JS2510 i frihetsgraden jag.



Figur 108: RAO-spekteret til den irregulære bølgen JS2510 i frihetsgraden jag.

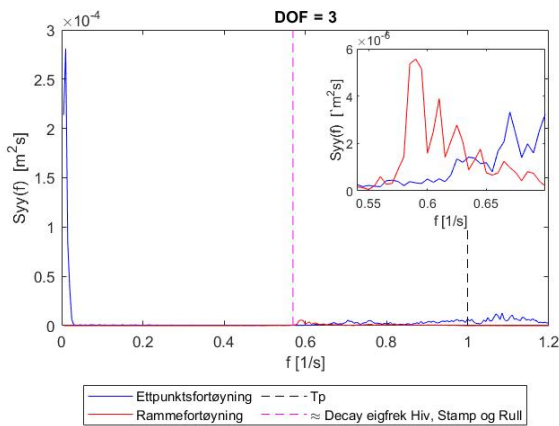


Figur 109: Resonansspekteret til den irregulære bølgen JS2512 i frihetsgraden jag.

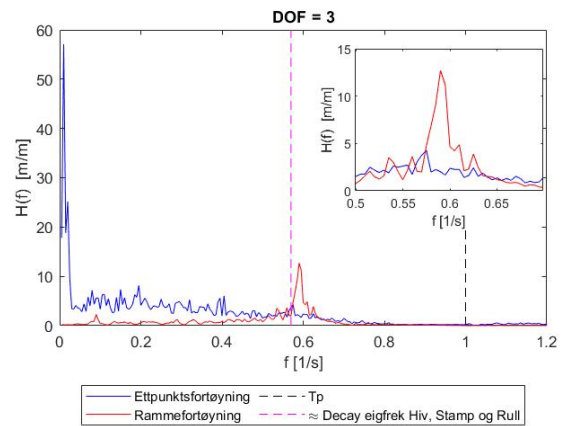


Figur 110: RAO-spekteret til den irregulære bølgen JS2512 i frihetsgraden jag.

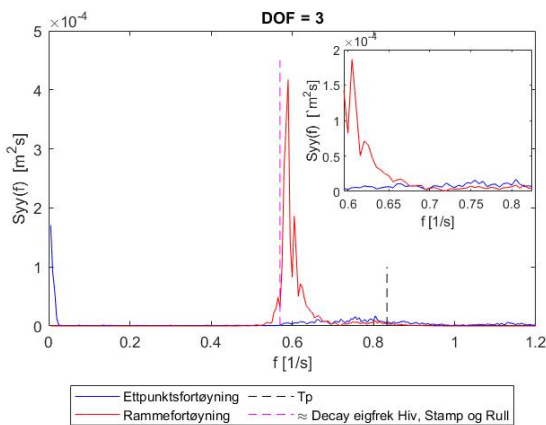
Fra Figurene 111 - 114 blir det illustrert forskjellene til oppsettet i frihetsgraden hiv. Responsspekteret viser at type bølge har mye å si i forhold om det er rammefortøyning eller ettpunktsforankring som dominerer med høyest toppunkter. Fra RAO-spekteret viser grafene at det er tilnærmet samsvar for de ulike bølgene, med unntak av at JS2510 har markant høyere toppunkt på ettpunktsforankringen enn JS2512.



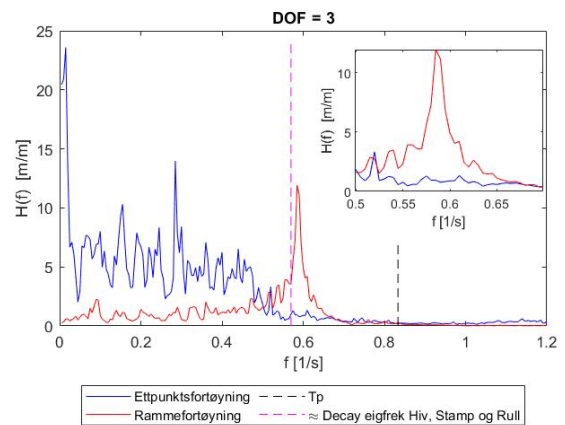
Figur 111: Responsspekteret til den irregulære bølgen JS2510 i frihetsgraden hiv.



Figur 112: RAO-spekteret til den irregulære bølgen JS2510 i frihetsgraden hiv.

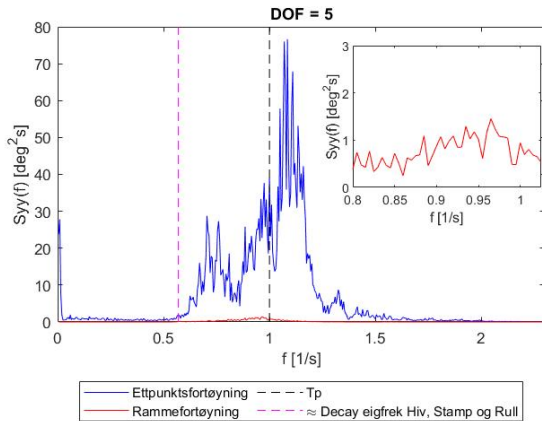


Figur 113: Responsspekteret til den irregulære bølgen JS2512 i frihetsgraden hiv.

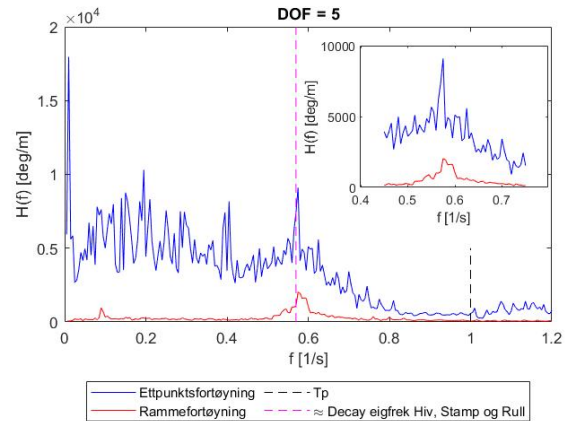


Figur 114: RAO-spekteret til den irregulære bølgen JS2512 i frihetsgraden hiv.

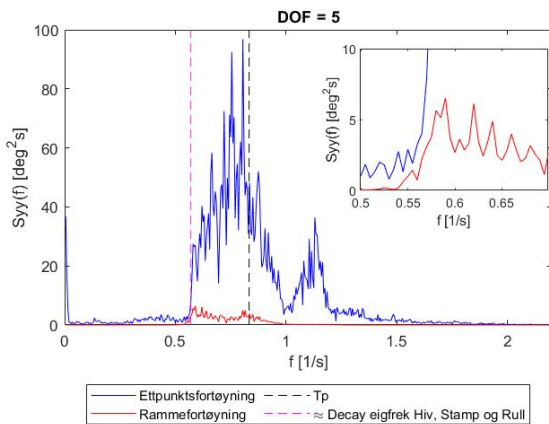
Figurene 115 - 118 illustrerer ulikhetene til oppsettene i frihetsgraden stamp. På grunn av forskjellen på størrelsen til de to oppsettene vil det være utfordrende å illustrere kurven til rammefortøyningen. I RAO- spekteret for begge bølgene vises det et lite toppunkt i egenfrekvensen til rammefortøyningen.



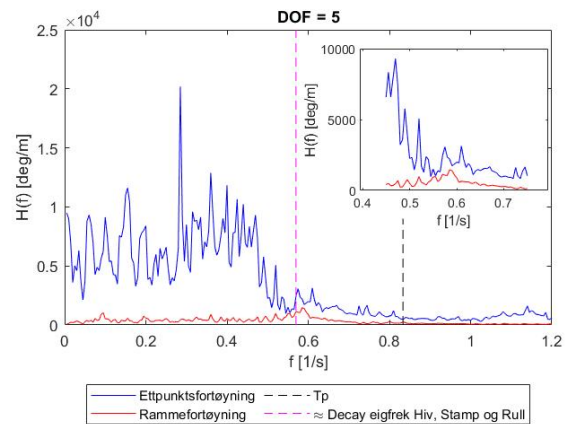
Figur 115: Resonsspekteret til den irregulære bølgen JS2510 i frihetsgraden stamp.



Figur 116: RAO-spekteret til den irregulære bølgen JS2510 i frihetsgraden stamp.

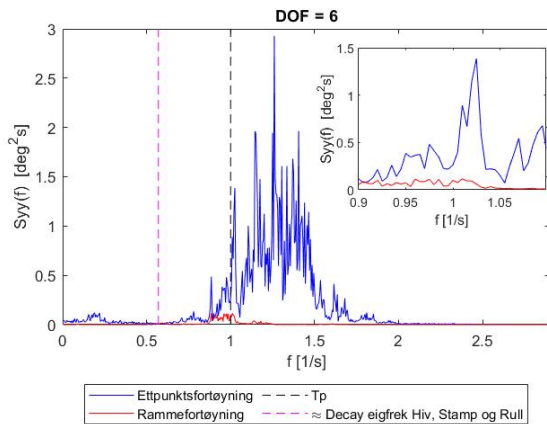


Figur 117: Resonsspekteret til den irregulære bølgen JS2512 i frihetsgraden stamp.

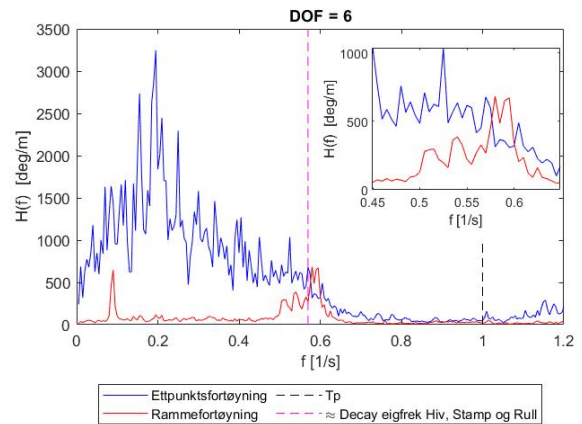


Figur 118: RAO-spekteret til den irregulære bølgen JS2512 i frihetsgraden stamp.

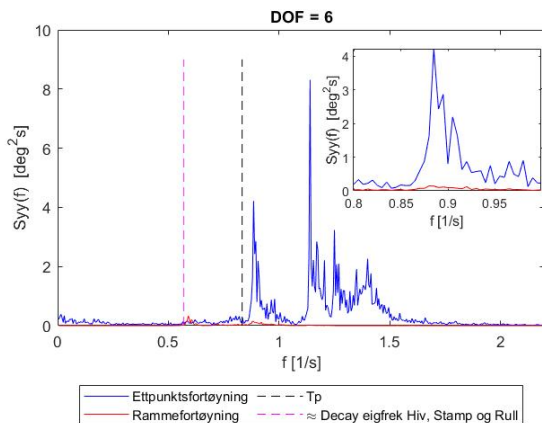
Fra Figurene 119 - 122 presenteres forskjellen for oppsettene i frihetsgraden rull. Det blir observert en markant ulikhet mellom rammefortøyningen og ettpunktsforankringen. Der ettpunktsforankringen har høyere toppunkter enn rammefortøyningen. For begge RAO-spektrene er det et toppunkt rundt der egenfrekvensen til jag ligger. Dette gjelder for alle frihetsgradene, og kan ha noe med at jag-bevegelsen som oftest vil bli påvirket uavhengig om hvilken frihetsgrad eller bølge som blir analysert.



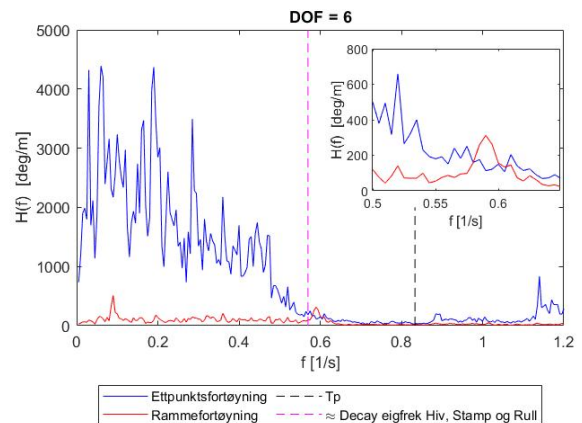
Figur 119: Resonsspekteret til den irregulære bølgen JS2510 i frihetsgraden rull.



Figur 120: RAO-spekteret til den irregulære bølgen JS2510 i frihetsgraden rull.



Figur 121: Resonsspekteret til den irregulære bølgen JS2512 i frihetsgraden rull.



Figur 122: RAO-spekteret til den irregulære bølgen JS2512 i frihetsgraden rull.

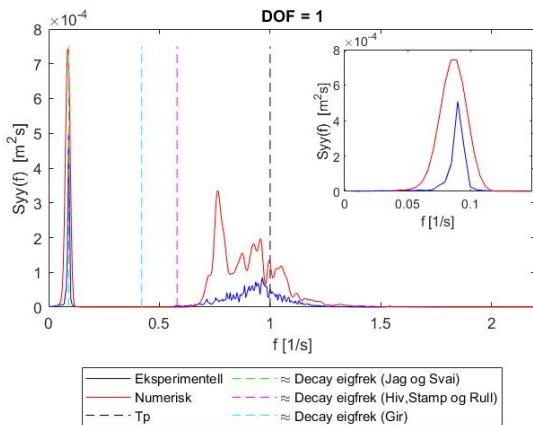


#### 4.4.2 Samsvar med numeriske resultater

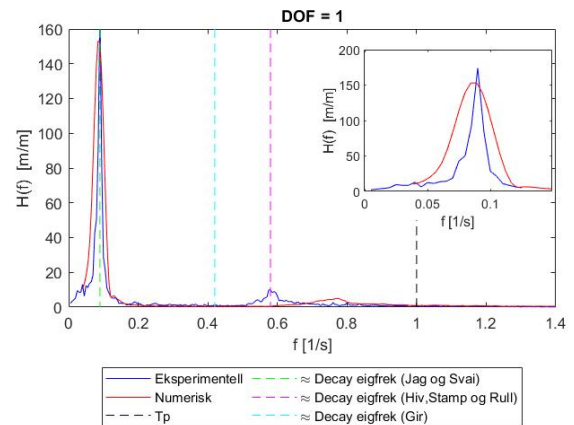
I denne delen av resultater skal de eksperimentelle resultatene sammenlignes mot de numeriske resultatene. De numeriske resultatene er hentet fra en parallell masteroppgave [7]. Resultatene skal sammenlignes for begge forankringsoppsettene i frihetsgradene jag, hiv, stamp og rull. Bølgen som er valgt ut er JONSWAP-bølgen JS2510, som har en  $T_p$  på 1 s og en  $H_s$  på 0.025 m. Fra rammefortøyningen er det hentet data fra repetisjon nummer en, og fra ettpunktsforankringen er det hentet data fra repetisjon nummer tre, som er uten lastcelle. Figurene 123 - 138 presenterer respons- og RAO-spektrene. For rammefortøyningen er det flere egenfrekvenser, enn ettpunktsforankringen. Dette kommer av, som nevnt tidligere i 4.1.3, at ettpunktsforankringen ikke ble utsatt for de samme bevegelsene som rammefortøyningen under decay-testene.

#### Rammefortøyning - JS2510

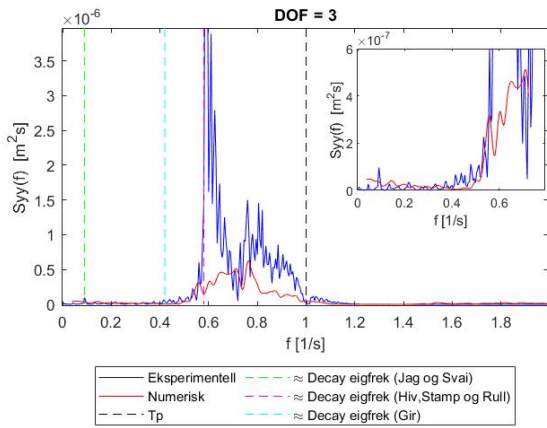
Det blir observert en likhet i frihetsgraden jag og hiv for de gjeldene egenfrekvensene i RAO-spektrene. I Figur 128 og 130 blir det observert en likhet mellom eksperimentell og numerisk i egenfrekvensen til jag. Dette kan skyldes at rammefortøyningen har en påvirkning på egenbevegelsen til Egget' og vil dermed ikke produsere en ren svingning. Dette medfører at en annen frihetsgrad blir påvirket, og i dette tilfelle er det jag. Det blir samtidig observert for alle figurene at de eksperimentelle resultatene har høyere energi enn de numeriske resultatene, bortsett fra Figur 123 og 127.



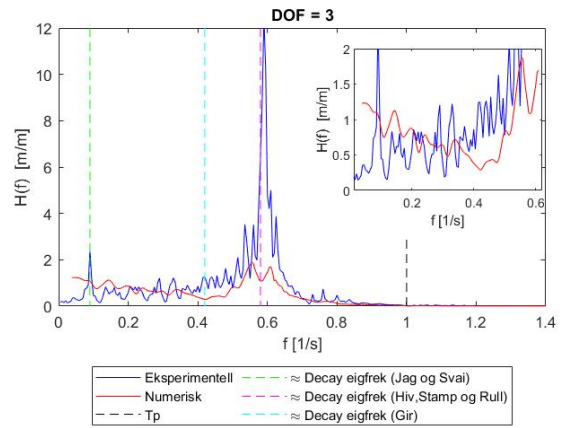
Figur 123: Responsspekteret til den eksperimentelle og numeriske JONSWAP-bølgen JS2510 i frihetsgraden jag.



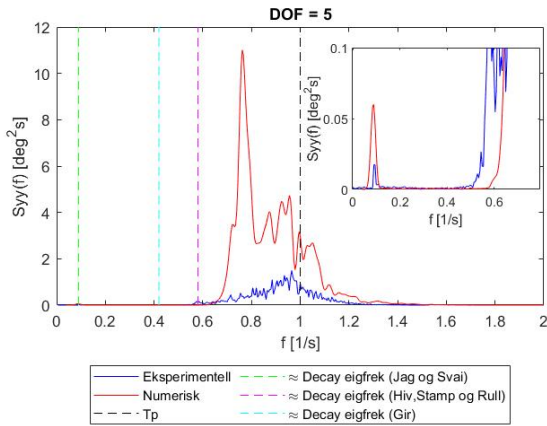
Figur 124: RAO-spekteret til den eksperimentelle og numeriske JONSWAP-bølgen JS2510 i frihetsgraden jag.



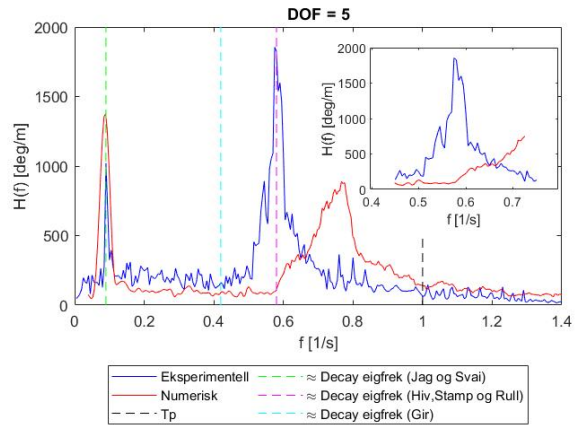
Figur 125: Resonansspektret til den eksperimentelle og numeriske JONSWAP-bølgen JS2510 i frihetsgraden hiv.



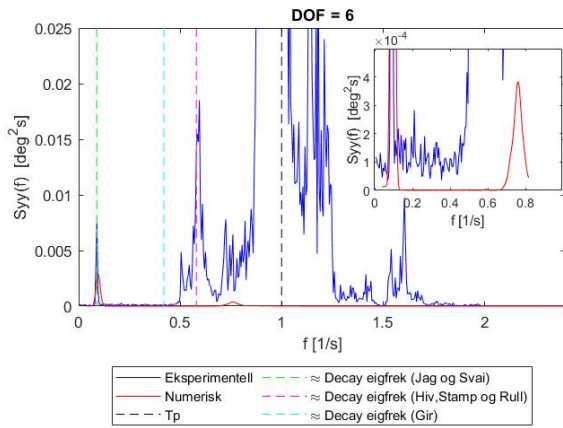
Figur 126: RAO-spektret til den eksperimentelle og numeriske JONSWAP-bølgen JS2510 i frihetsgraden hiv.



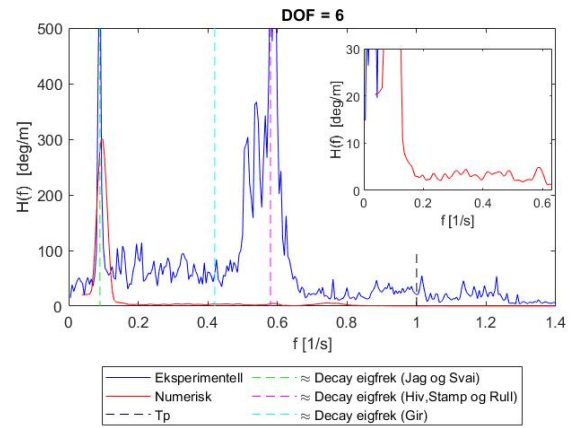
Figur 127: Resonansspekteret til den eksperimentelle og numeriske JONSWAP-bølgen JS2510 i frihetsgraden stamp.



Figur 128: RAO-spekteret til den eksperimentelle og numeriske JONSWAP-bølgen JS2510 i frihetsgraden stamp.



Figur 129: Resonansspekteret til den eksperimentelle og numeriske JONSWAP-bølgen JS2510 i frihetsgraden rull.

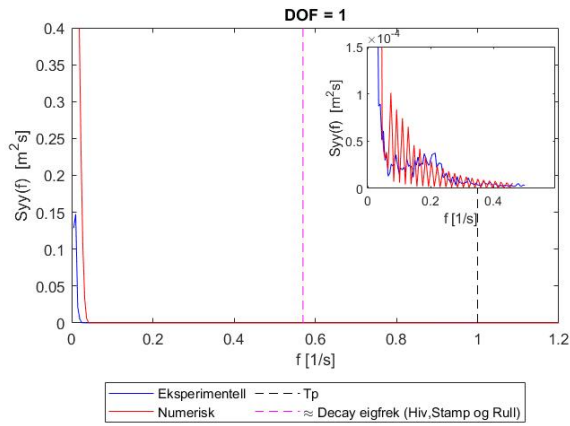


Figur 130: RAO-spekteret til den eksperimentelle og numeriske JONSWAP-bølgen JS2510 i frihetsgraden rull.

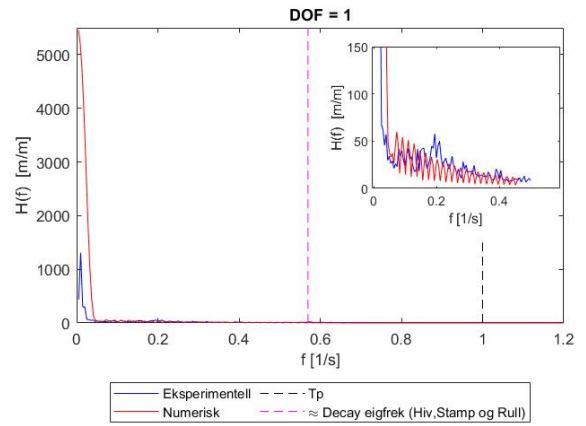
### Ettpunktsforankring - JS2510

Det er store forskjeller for sammenligningen mellom eksperimentell og numerisk for ettpunktsforankring. Dette kan være på grunn av størrelsesforholdet mellom resultatene. Eneste tydelige likheten er i Figur 131 og 132, der det blir observert toppunktene for begge resultatene i egenfrekvensen til jag. I begge figurene blir det observert nedgående svingninger for de numeriske verdiene. I Figur 134 blir det observert et lite toppunkt i egenfrekvensen til hiv for begge oppsettene.

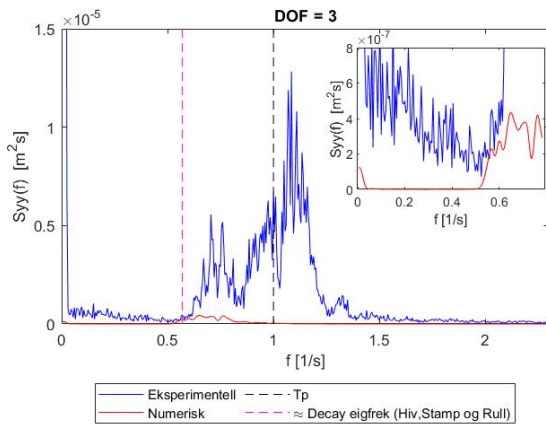
For alle frihetsgradene blir det observert et toppunkt der egenfrekvensen til jag befinner seg. Jag-bevegelsen blir også observert for de fleste av frihetsgradene for rammefortøyningen. For ettpunktsforankringen kan fenderen ha en stor påvirkning på hvorfor jag-bevegelsen blir trigget.



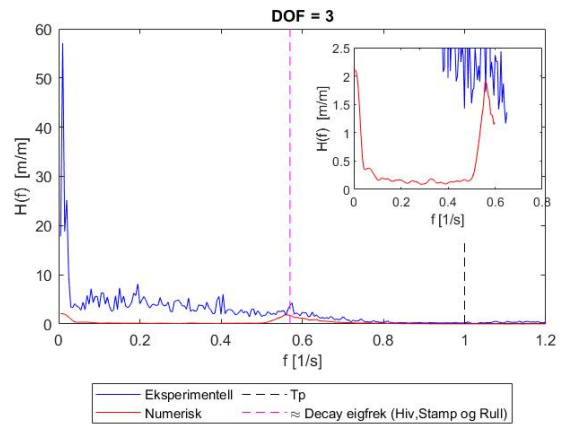
Figur 131: Resonansspekteret til den eksperimentelle og numeriske JONSWAP-bølgen JS2510 i frihetsgraden jag.



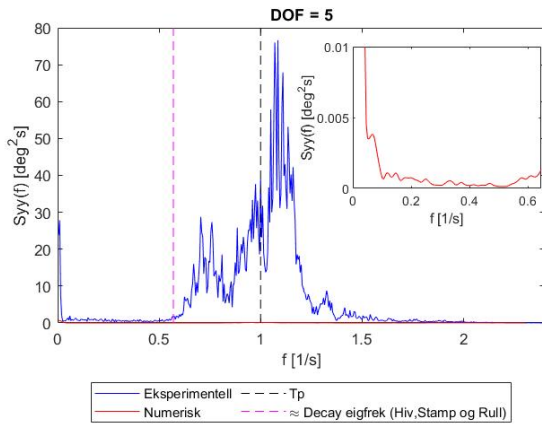
Figur 132: RAO-spekteret til den eksperimentelle og numeriske JONSWAP-bølgen JS2510 i frihetsgraden jag.



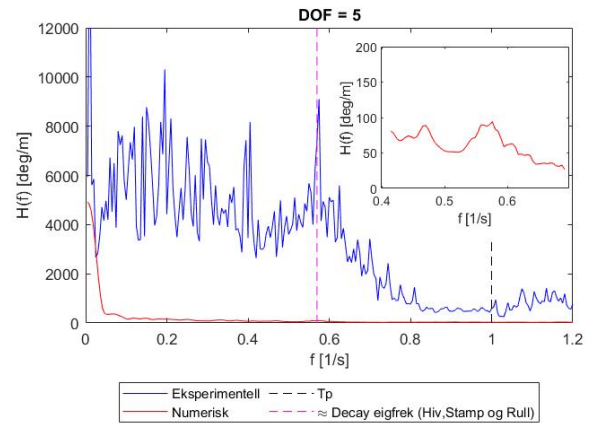
Figur 133: Resonansspekteret til den eksperimentelle og numeriske JONSWAP-bølgen JS2510 i frihetsgraden hiv.



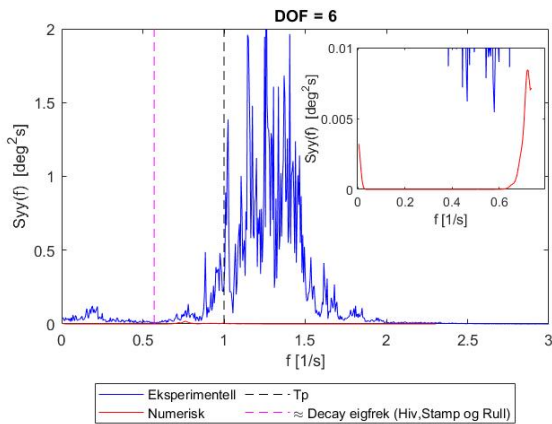
Figur 134: RAO-spekteret til den eksperimentelle og numeriske JONSWAP-bølgen JS2510 i frihetsgraden hiv.



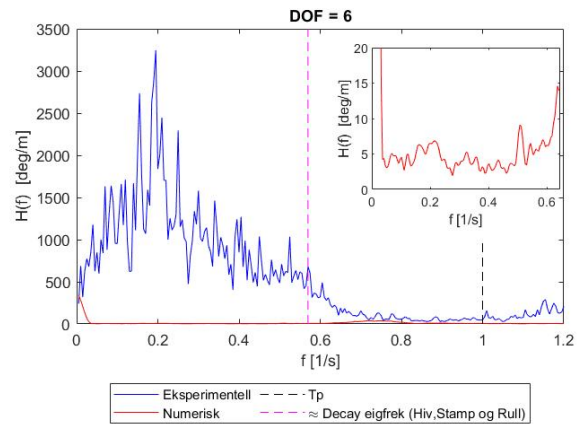
Figur 135: Responsspekteret til den eksperimentelle og numeriske JONSWAP-bølgen JS2510 i frihetsgraden stamp.



Figur 136: RAO-spekteret til den eksperimentelle og numeriske JONSWAP-bølgen JS2510 i frihetsgraden stamp.



Figur 137: Responsspekteret til den eksperimentelle og numeriske JONSWAP-bølgen JS2510 i frihetsgraden rull.



Figur 138: RAO-spekteret til den eksperimentelle og numeriske JONSWAP-bølgen JS2510 i frihetsgraden rull.

## 5 Konklusjon

I denne masteroppgaven ble det gjennomført flere tester for å kunne konkludere om hvilke av de to forankringsoppsettene som egner seg best og som gir minst belastning i forhold til de naturlige bevegelsene til Egget<sup>®</sup>. Den første testen som ble utført var krengeprøven, som ga svarene på om tyngdepunktsatsene mellom de eksperimentelle- og numeriske dataene var samstemte. Derfra ga resultatene et høyt samsvar og at dataene er på et akseptabelt hydrostatisk nivå.

Fra decay-testene ble det påvist minimale forskjeller mellom rammefortøyningen og ettpunktsforankringen. Kurvetilpasningen for de gitte frihetsgradene for begge forankringsoppsettene viser høy grad av samsvar. For ettpunktsforankringen gav det ingen signifikante resultater i frihetsgradene jag, svai og gir. Resultatet kan komme av at bevegelsen i de angitte retningene ble for lange og opplevdes som motstandsdyktig. Dette kan indikere på at frihetsgradene i ettpunktsforankringen har en påvirkning på Egget<sup>®</sup> sin naturlige svingning. Etter å ha analysert decay-testene ble det observert at egenfrekvensen til Egget<sup>®</sup> ligger på rundt 0.58 Hz i frihetsgraden hiv, stamp og rull. For testen der frekvensen ligger rundt denne verdien kan dette skape en uheldig bevegelse for Egget<sup>®</sup>. Dette ble observert for de regulære testene for ettpunktsforankringen, der frekvensen på 0.62 Hz ble undersøkt, og Egget<sup>®</sup> fikk store bevegelser i frihetsgraden stamp, og tok inn mye vann.

For de irregulære bølgetestene ble begge oppsettene vitne til variasjon i frihetsgraden stamp og rull. Variasjonene kan komme av forstyrrelser som oppsto når bølgen blir reflektert i tankveggen. Resultatet til ettpunktsforankringen for repetisjonene med- og uten lastceller ble noe ulik. Dette på grunn av at lastcelleledningene kan ha påvirket egenbevegelsen til Egget<sup>®</sup>. Det ble også teste Egget<sup>®</sup> med et lokk for å undersøke sloshing-effekten. Der ble det observert at tilstedeværelsen av et lokk kan bidra til å påvirke den naturlige bevegelsen til vannmassen i Egget<sup>®</sup> ved å justere den frie bevegelsen. Dette ble observert med en økning i RAO-spektrene.

Ved å analysere sammenhengen mellom rammefortøyningen og ettpunktsforankringen opp imot hverandre var det markante forskjeller i form av høyde på toppunktene. Ettpunktsforankringen var dominerende i alle frihetsgrader for de to JONSWAP-bølgene. Mens frihetsgraden hiv viste klare likheter mellom bølgeforholdene, ble det ikke registrert noen likheter mellom frihetsgradene til oppsettene. Sammenhengen mellom de eksperimentelle og numeriske dataene for de to oppsettene er varierende. De eksperimentelle resultatene hadde høyere verdier sammenlignet med de numeriske resultatene. Dette gjorde det utfordrende å tyde resultatene på enkelte frihetsgrader. Det ble observert mer samsvar mellom dataene ved rammefortøyningen, enn ved ettpunktsforankringen.

Begge forankringsoppsettene har sine fordeler og ulemper. Derfor er det vanskelig å trekke en entydig konklusjon om hvilke av forankringene som er best egnet. Rammefortøyningen er et bra valg for oppsettet når det gjelder å holde Egget<sup>®</sup> mest mulig i ro i forhold til ytre krefter, som bølger. For egenbevegelsen til Egget<sup>®</sup> er ettpunktsforankringen et godt egnet oppsett. Basert på problematikken rundt arealbegrensningene i dagens næring, kan det konkluderes med at ettpunktsforankringen representerer en mer gunstigere løsning, enn de tradisjonelle rammefortøyningene. Ettpunktsforankringen vil få større bevegelser, og vil dermed kreve mer avansert forankring. Dette validerer hypotesen om at ettpunktsforankringen vil skape større bevegelser. Resultatet er verdt å tenke på videre ved bruk av ettpunktsforankring, og at når  $T_p$  øker vil frekvensen nærme seg egenfrekvensen til Egget<sup>®</sup> i hiv, stamp og rull. Dette kan være uheldig med tanke på store stamp-bevegelser, som vil påføre fortøyningen og forankringen belastning. I forbindelse med lokasjon av Egget<sup>®</sup> må dette tas hensyn til da bølgeparametrene som  $T_p$  har betydning for egenfrekvensen.

## 6 Veien videre

I arbeidet med å skrive denne masteroppgaven har det i prosessen fremkommet temaer det kunne vært interessant å utforske videre. Ved å kartlegge de sentrale temaene som er diskutert i oppgaven, presenteres følgende anbefalinger til videre arbeid.

- Med hensyn til forankringssystem, er stabiliteten av sloshing-effekten og fiskebestandens levevilkår i Egget<sup>®</sup> viktig. Motivasjon for fiskehelse er stor, men på grunn av temaets størrelse ble dette ikke tatt med. Ettersom sloshing-analysene ble utført helt på slutten av testperioden, og tidsressursene var begrenset, kunne det ha blitt utført mer testing innenfor dette feltet. Siden resultatdelen av sloshing-effekten gav minimale variasjoner, kan det gjennomføres flere tester og analyser for å undersøke om resultatene er repeterbare.
- Ettersom det bare er utført tester for lastceller på ettpunktsforankringen og ikke for rammefortøyningen, bør det utføres ytterlige tester. Lastcelledataen for rammefortøyningen gir mest sannsynlig høyere laster, men mindre bevegelser. De mindre bevegelsene blir illustrert i resultater for ettpunktsforankringen, der det blir vist at den type forankring ikke gir store utslag. Samtidig kan det bli sett på faseforskyvningen mellom lastcelledata og data fra Qualisys. Ledningene til lastcellene har vist seg å påvirke bevegelsen til Egget<sup>®</sup>, som observert i 4.3.3. Det kan bli undersøkt videre om tynnere ledninger kan ha en mindre påvirkning. I tillegg om det er en annen måte å feste ledningene på modellen, uten at det skal gi en stor påvirkning på resultatene.
- En interessant del er å undersøke muligheten for flere modell-egg i en ramme. I dette prosjektet ble bare ett egg testet ut. Rammen kan være forankret i bunnen av tanken. Her vil det være interessant å se på hele bevegelsen av rammefortøyningen og i tillegg til modellen.
- For RAO-beregningene kan det være interessant å se på andre bølger, med andre bølgehøyder og bølgeperioder. Dette kan bidra til å få en dypere forståelse for hvordan forankringsoppsettet responderer til uregelmessig sjø og modellens håndtering av de ulike frihetsgradene. Som det ble observert av de regulære bølgene, ble frekvensen som lå på rundt 0.62 Hz ugunstig for Egget<sup>®</sup>. Dette fordi Egget<sup>®</sup> var nær å nå strukturens egenfrekvens i hiv, stamp og rull, og forårsaket store bevegelser i stamp. Dette resulterte i at Egget<sup>®</sup> tok inn mye vann, og dette er en faktor som det må tas hensyn til i fremtidige tester.



## Referanser

- [1] Regjeringen.no. Norsk havbruksnæring.  
<https://www.regjeringen.no/no/tema/mat-fiske-og-landbruk/fiskeri-og-havbruk/1/oppdrettslaksen/Norsk-havbruksnaring/id754210/>,  
Oktober 2021. Hentet: 13.09.2022.
- [2] R. Tveterås, M. Hovland, T. Reve, B. Misund, R. Nystøyl, H. Bjelland, A. Misund, and Ø. Fjelldal. Verdiskapingspotensiale og veikart for havbruk til havs. 2020.  
Hentet: 25.05.2023.
- [3] D. Kristiansen, P. C. Endresen, P. Lader, B. Su, Z. Volent, and V. Aksnes. SJØFLO - Sjøegenskaper og forankring til flytende lukkede oppdrettsanlegg. Sluttrapport 2018:00191, SINTEF Ocean, 2 2018. Hentet: 20.12.2022.
- [4] A. Fredheim, Ø. Jensen, and S.H. Gjørund. Sikre og mindre arealkrevende fortøyningsystem for havbruksanlegg. Rapport A23164, SINTEF, 6 2012.  
Hentet: 14.03.2023.
- [5] I. Snøfugl. Bølger kan ødelegge for nytt oppdrettssystem.  
<https://forskning.no/sintef-fiskesykdommer-partner/bolger-kan-odelegge-for-nytt-oppdrettssystem/295124>, 2018.  
Hentet: 04.05.2023.
- [6] Hauge Aqua. Egget<sup>®</sup>. <https://haugeaqua.com/technology/egget>.  
Hentet: 13.09.2022.
- [7] S.E. Hansen. Numerisk analyse av forankringsløsninger for det lukkede oppdrettsanlegget Egget<sup>®</sup>. Master's thesis, Universitetet i Bergen, 2023.  
Hentet: 11.05.2023.
- [8] X.H Huang, H.Y Liu, Y. Hu, T.P Yuan, Q.Y Tao, S.M Wang, and Z.X Liu. Hydrodynamic performance of a semi-submersible offshore fish farm with a single point mooring system in pure waves and current. *Aquacultural Engineering*, 90:102075, 2020.  
Hentet: 11.05.2023.
- [9] H. Høidal, J. Nygård, and J.M. Gjørum. Laminering av et lukket oppdrettsanlegg.  
[https://hvlopen.brage.unit.no/hvlopen-xmlui/bitstream/handle/11250/2762414/Gjaerum\\_Hoeidal\\_Nygaard.pdf?sequence=1](https://hvlopen.brage.unit.no/hvlopen-xmlui/bitstream/handle/11250/2762414/Gjaerum_Hoeidal_Nygaard.pdf?sequence=1), 2021. Hentet: 24.04.2023.

- [10] MathWorks. MATLAB Release Notes.  
[https://se.mathworks.com/help/pdf\\_doc/matlab/rn.pdf](https://se.mathworks.com/help/pdf_doc/matlab/rn.pdf). Hentet: 24.04.2023.
- [11] DNV GL. Sesam future description.  
[https://www.dnv.com/Images/Sesam-Feature-Description\\_tcm8-58834.pdf](https://www.dnv.com/Images/Sesam-Feature-Description_tcm8-58834.pdf), 2017. Hentet: 13.05.2023.
- [12] S. Steen. Lecture notes, Experimental Methods in Marine Hydrodynamics.  
[https://home.hvl.no/ansatte/gste/ftp/MarinLab\\_files/Litteratur/NTNU\\_Eksprimentelle\\_metoder\\_kompendium.pdf](https://home.hvl.no/ansatte/gste/ftp/MarinLab_files/Litteratur/NTNU_Eksprimentelle_metoder_kompendium.pdf), 2014. Hentet: 13.05.2023.
- [13] D. Bolster, R.E. Hershberger, and R.J. Donnelly. Dynamic similarity, the dimensionless science. AIP Publishing, 2011. Hentet: 25.05.2023.
- [14] ITTC. Guideline for VIV Testing.  
<https://ittc.info/media/4158/75-02-07-0310.pdf>, 2014. Hentet: 22.05.2023.
- [15] NTNU. General modelling and scaling laws. [https://home.hvl.no/ansatte/gste/ftp/MarinLab\\_files/Litteratur/NTNU\\_Scaling\\_Laws.pdf](https://home.hvl.no/ansatte/gste/ftp/MarinLab_files/Litteratur/NTNU_Scaling_Laws.pdf). Hentet: 22.05.2023.
- [16] G. Øyro. Oppdrift og Arkimedes sin lov. <https://www.oyro.no/oppdrift.html>. Hentet: 29.04.2023.
- [17] S.K. Chakrabarti. HANDBOOK OF OFFSHORE ENGINEERING. Elsevier, Plainfield, Illinois, USA, 2nd edition, 2005.
- [18] A.F. Molland. The Maritime Engineering Reference Book. Elsevier Butterworth-Heinemann, Jordan Hill, Oxford, 2008.
- [19] Norges arktiske universitet UIT. Formelsamling til tek-1011 anvendt mekanikk.  
<http://meccanica.uit.no/formler.pdf>. Hentet: 25.05.2023.
- [20] K.J. Rawson and E.C. Tupper. Basic Ship Theory. Elsevier Butterworth-Heinemann, Jordan Hill, Oxford, 5th edition, 2002. ISBN: 0 7506 5398 1.
- [21] B. Gjevik an G.K. Pedersen and K. Trulsen. Forelesninger i bølgeteori.  
<https://www.uio.no/studier/emner/matnat/math/MEK4320/v06/undervisningsmateriale/kompendium.pdf>, 2005. Hentet: 23.01.2023.
- [22] B. Pettersen. Marinteknikk 3, Hydrodynamikk. Akademika, 2022.

- [23] O.M. Faltinsen. Sea loads on ships and offshore structures. Cambridge University Press, 1993. ISBN: 0 521 45870 6.
- [24] DNV. Modelling and Analysis of Marine Operations. [https://home.hvl.no/ansatte/tct/FTP/H2021%20Marinteknisk%20Analyse/Regelverk%20og%20standarder/DnV\\_documents/RP-H103.pdf](https://home.hvl.no/ansatte/tct/FTP/H2021%20Marinteknisk%20Analyse/Regelverk%20og%20standarder/DnV_documents/RP-H103.pdf), 2011. Hentet: 29.12.2022.
- [25] DNV. Environmental Conditions and Environmental Loads. <https://rules.dnv.com/docs/pdf/dnvpmp/codes/docs/2014-04/RP-C205.pdf>, 2014. Hentet: 12.03.2023.
- [26] Y. Song, X. Guo, H. Wang, X. Tian, H. Wei, and X. Zhang. Performance analysis of an adaptive bistable point absorber wave energy converter under white noise wave excitation. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 12(2):1090–1099, 2021. Hentet: 23.02.2023.
- [27] P. Aird. Deepwater Drilling. Elsevier, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford, OX5 1GB, United Kingdom, 2019.
- [28] A.H. Gjeraker. Response amplitude operator estimation and wave modeling sensitivity. Master’s thesis, NTNU, juni 2021. Hentet: 23.02.2023.
- [29] J.N. Newamn. Marine hydrodynamics. Massachusetts Institute of Technology, 40th edition, 2017. ISBN: 9780262534826.
- [30] C.Q Judge. Seakeeping and Maneuvering. [https://www.usna.edu/NAOE/\\_files/documents/Courses/EN455/EN455\\_Chapter4.pdf](https://www.usna.edu/NAOE/_files/documents/Courses/EN455/EN455_Chapter4.pdf), 2019. Hentet: 04.04.2023.
- [31] J.P. Bentley. Principles of measurement systems. Pearson Prentice Hall, Harlow, England ; New York, 4th ed edition, 2005. ISBN: 978-0-13-043028-1.
- [32] E.C. Tupper. Introduction to Naval Architecture. Elsevier Butterworth-Heinemann, 1975. ISBN: 0 7506 6554 8.
- [33] K.T. Ma, Y. Luo, T. Kwan, and Y. Wu. Mooring System Engineering for Offshore Structures. Gulf Professional Publishing, 1250 Sixth Avenue, Suite 300, San Diego, CA 92101-4311, USA, 2019. ISBN: 978-0-12-818551-3. Hentet: 20.12.2022.

- [34] M.J. Giuliadori, H.L. Lujan, W.S. Briggs, G.Palani, and S.E. DiCarlo. Hooke's law: applications of a recurring principle. *Advances in Physiology Education*, 33:293–296, 2009. Hentet: 20.12.2022.
- [35] S. Weller, P. Davies, L. Johanning, and S. Banfield. Guidance on the use of synthetic fibre ropes for marine energy devices. <https://ore.exeter.ac.uk/repository/bitstream/handle/10871/21606/Guidance%20on%20the%20use%20of%20synthetic%20fibre%20ropes%20for%20marine%20energy%20devices.pdf?sequence=1&isAllowed=y>, 2013. Hentet: 04.04.2023.
- [36] Aquastructures. Fortøyningsanalyser. <https://aquastructures.no/fortoyningsanalyse/>. Hentet: 15.12.2022.
- [37] EIVA-SAFEX. Beskrivelse av oppbygging av fortøyningsssystem . <https://eiva-safex.no/havbruk/beskrivelse-av-oppbygning-av-fortoyningsssystemet/>. Hentet: 15.12.2022.
- [38] CERTEX. Brukerhåndbok for CN fortøyningsssystem . [https://www.certex.no/sites/certex-no/docs/handbok\\_forntoyningsystem2019\\_3\\_2.pdf](https://www.certex.no/sites/certex-no/docs/handbok_forntoyningsystem2019_3_2.pdf), 2019. Hentet: 15.12.2022.
- [39] J. DeCew, I. Tsukrov, A. Risso, M.R. Swift, and B. Celikkol. Modeling of dynamic behavior of a single-point moored submersible fish cage under currents. *Aquacultural Engineering*, 8, 2010. ISSN: 0144-8609. Hentet: 04.04.2023.
- [40] C.C. Huang, H.J. Tang, and B.S. Wang. Numerical modeling for an in situ single-point-mooring cage system. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, July 2010. Hentet: 04.04.2023.
- [41] SCALE AQ. Anker . <https://scaleaq.no/produkt/anker/>. Hentet: 16.12.2022.
- [42] AQUALINK. Ploganker . <https://www.aqualink.no/ploganker>. Hentet: 16.12.2022.
- [43] TEKMAR. Fortøyning med fjellbolt . <https://tekmar.no/wp-content/uploads/2016/08/fjellbolt-fortoyning-havbruk-2010-09.pdf>. Hentet: 22.12.2022.
- [44] K. Roaldsnes. Havbruksteknologi - Naturlaster og Forankring . [https://home.hvl.no/ansatte/gste/ftp/MarinLab\\_files/Litteratur/Last\\_komp\\_havbruksteknologi.pdf](https://home.hvl.no/ansatte/gste/ftp/MarinLab_files/Litteratur/Last_komp_havbruksteknologi.pdf), 1998. Hentet: 15.12.2022.

- [45] Mørenot Aquaculture. Brukerhåndbok, fortøyning.  
<https://www.morenot.com/no/aquaculture/brukerhandboker/fortoyning/>, 2022.  
Hentet: 25.12.2022.
- [46] Aqualine. Fortøyning av flytekrager. <https://tekmar.no/wp-content/uploads/2016/09/8-Aqualine-Martin-S%C3%B8reide.pdf>. Hentet: 25.12.2022.
- [47] MathWorks. MATLAB. <https://se.mathworks.com/products/matlab.html>.  
Hentet: 24.04.2023.
- [48] Høgskulen på Vestlandet. MarinLab. [https://www.hvl.no/contentassets/de9d0d0d3cc146f3a0782a81d34f8e13/marinlab\\_info.pdf](https://www.hvl.no/contentassets/de9d0d0d3cc146f3a0782a81d34f8e13/marinlab_info.pdf). Hentet: 21.05.2023.
- [49] Høgskulen på Vestlandet. Retningslinjer LAB.  
[https://home.hvl.no/ansatte/gste/ftp/MarinLab\\_files/Retningslinjer/Retningslinjer\\_LAB\\_leaflet\\_oppdaterert2021november.pdf](https://home.hvl.no/ansatte/gste/ftp/MarinLab_files/Retningslinjer/Retningslinjer_LAB_leaflet_oppdaterert2021november.pdf), 2021.  
Hentet: 21.05.2023.
- [50] iLaks.no. Hauge Aqua har inngått byggekontrakt på det første Egget. <https://ilaks.no/hauge-aqua-har-inngatt-byggekontrakt-pa-det-forste-egget/>, 2021. Hentet: 20.05.2023.
- [51] Edinburgh Designs. Wave Gauges.  
<http://www4.edesign.co.uk/product/wavegauges/>. Hentet: 10.11.2022.
- [52] Edinburgh Designs. Wave generating software.  
<http://www4.edesign.co.uk/product/wave-generating-software/>.  
Hentet: 23.05.2023.
- [53] Qualisys Track Manager QTM. User manual. [https://home.hvl.no/ansatte/gste/ftp/MarinLab\\_files/Manualer\\_utstyr/QTM-usermanual.pdf](https://home.hvl.no/ansatte/gste/ftp/MarinLab_files/Manualer_utstyr/QTM-usermanual.pdf). Hentet: 29.12.2022.
- [54] Qualisys. Rigid body overview.  
[https://docs.qualisys.com/getting-started/content/17\\_rigid\\_body\\_series/17a\\_how\\_to\\_track\\_rigid\\_bodies/rigid\\_body\\_overview.htm](https://docs.qualisys.com/getting-started/content/17_rigid_body_series/17a_how_to_track_rigid_bodies/rigid_body_overview.htm). Hentet: 25.05.2023.
- [55] I.Muller, R. Machado de Brito, C.E. Pereira, and V. Brusamarello. Load cells in force sensing analysis – theory and a novel application. IEEE Instrumentation Measurement Magazine, 13(1):15–19, 2010. Hentet: 25.05.2023.

- [56] Elfa Distrelec. Sen-13329 - tal220 straight bar load cell 10kg, sparkfun electronics.  
[https://www.elfadistrelec.no/en/tal220-straight-bar-load-cell-10kg-sparkfun-electronics-sen-13329/p/30145506?ext\\_cid=shgooaqnono-Shopping-PerformanceMax-CSS&&cq\\_src=google\\_ads&cq\\_cmp=18221858120&cq\\_con=&cq\\_term=&cq\\_med=pla&cq\\_plac=&cq\\_net=x&cq\\_pos=&cq\\_plt=gp&gclsrc=aw.ds&gclid=Cj0KCQjwyLGjBhDKARIsAFRNgW8NBV\\_Lw40bCSc1V0xNz3Tuz70c0eKkA7zuU5Wn7mOSppx7dwg2aHcaAjqiEALw\\_wcB&gclsrc=aw.ds](https://www.elfadistrelec.no/en/tal220-straight-bar-load-cell-10kg-sparkfun-electronics-sen-13329/p/30145506?ext_cid=shgooaqnono-Shopping-PerformanceMax-CSS&&cq_src=google_ads&cq_cmp=18221858120&cq_con=&cq_term=&cq_med=pla&cq_plac=&cq_net=x&cq_pos=&cq_plt=gp&gclsrc=aw.ds&gclid=Cj0KCQjwyLGjBhDKARIsAFRNgW8NBV_Lw40bCSc1V0xNz3Tuz70c0eKkA7zuU5Wn7mOSppx7dwg2aHcaAjqiEALw_wcB&gclsrc=aw.ds). Hentet: 23.05.2023.
- [57] National instruments. cdaq-9174.  
<https://www.ni.com/en-no/support/model.cdaq-9174.html>. Hentet: 11.05.2023.
- [58] T.Chai and R.R. Draxler. Root mean square error (rmse) or mean absolute error (mae)?  
<https://gmd.copernicus.org/preprints/7/1525/2014/gmdd-7-1525-2014.pdf>, 2014. Hentet: 24.05.2023.
- [59] MathWorks. lsqcurvefit .  
<https://se.mathworks.com/help/optim/ug/lsqcurvefit.html>. Hentet: 23.01.2023.
- [60] MathWorks. fft, Fast Fourier transform. [https://se.mathworks.com/help/matlab/ref/fft.html?searchHighlight=FFT&s\\_tid=srchtitle\\_FFT\\_1](https://se.mathworks.com/help/matlab/ref/fft.html?searchHighlight=FFT&s_tid=srchtitle_FFT_1). Hentet: 29.12.2022.
- [61] MathWorks. pwelch. <https://se.mathworks.com/help/signal/ref/pwelch.html>. Hentet: 29.12.2022.
- [62] MathWorks. butter, Butterworth filter design. [https://se.mathworks.com/help/signal/ref/butter.html?searchHighlight=butter&s\\_tid=srchtitle\\_butter\\_1](https://se.mathworks.com/help/signal/ref/butter.html?searchHighlight=butter&s_tid=srchtitle_butter_1). Hentet: 20.03.2023.