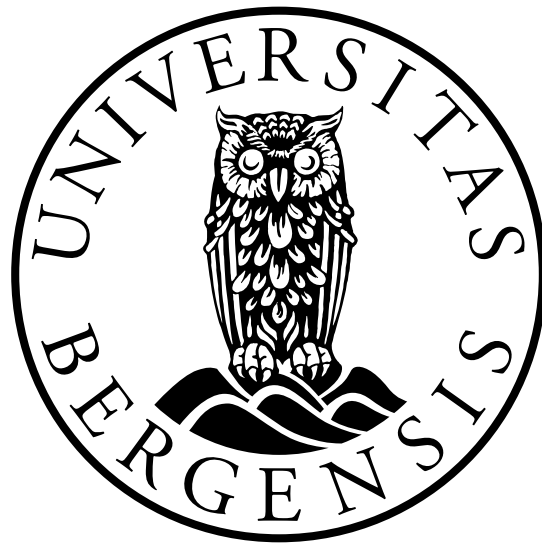


# Numerisk analyse av forankringsløsninger for det lukkede oppdrettsanlegget Egget<sup>®</sup>

Simen Emil Hansen



Masteroppgave i Havteknologi

Universitetet i Bergen  
Institutt for fysikk og teknologi

Juni 2023

-Denne siden skal være blank-

# Sammendrag

Havbruksindustrien er en av de viktigste næringene vi har i Norge, men det er knyttet flere utfordringer til praksisen rundt oppdrett av laks. Problemer med lakselus, sykdommer og utslipp av uønskede stoffer er med på å bremse utviklingen av næringen. Dagens oppdrettsanlegg består i hovedsak av åpne merder hvor notposer holder fisken samlet. I merdene blir fisken påvirket av det ytre vannvolumet og kan bli eksponert for lus, alger og sykdommer. For å løse disse problemene har Ovum AS utviklet en lukket oppdrettsenhet som heter Egget<sup>®</sup>. I denne konstruksjonen er fisken skjermet for lus og alger, vannkvaliteten kan optimaliseres og man kan samle opp fôrrester og bunnslam.

Målet med denne oppgaven er å undersøke ulike forankringsmetoder til Egget<sup>®</sup>, hvor det blir gjennomført numeriske analyser av rammefortøyning og ettpunktsforankring. I oppgaven er resultatene fra de numeriske simuleringene også sammenlignet mot eksperimentelle forsøk som er gjennomført i en parallell masteroppgave. Rammefortøyning er en standardisert forankringsmetode for tradisjonelle oppdrettsanlegg og sørger for godt samspill mellom akvakulturenhetene. Siden Egget's konstruksjon skiller seg fra dagens merder er det i denne oppgaven utviklet et konsept av en ettpunktsforankring, hvor konstruksjonen kun er forankret til bunn med én ankerline. Dette gjør at konstruksjonen fritt kan rotere med miljøkreftene.

Resultatene fra rammefortøyningen viser at lengre bølgeperioder og høyere bølger gir større respons. Sammenligner man RAOene for numeriske og eksperimentelle analyser ser man samme tendenser for frihetsgradene  $\dot{\theta}$ ,  $\dot{\psi}$  og  $\dot{\phi}$ . Ettpunktsforankringen gir som forventet større utslag i horisontalforskyvning ved samme sjøtilstander som rammefortøyningen og at overflatearealet som beslaglegges er større. Sammenligner man RAOene til rammefortøyningen og ettpunktsforankringen ser man at ettpunktsforankringen domineres av svært lave frekvenser i frihetsgradene  $\dot{\theta}$  og  $\dot{\psi}$ , og ved høyere frekvens ser man samme tendenser i  $\dot{\phi}$  og rull.

Ettpunktsforankringen har potensiale til videre utvikling, men man er avhengig av å løse utfordringer knyttet til samspillet med resten av oppdrettsanlegget. Rammefortøyningen er en godt kjent forankringsmetode innen akvakultur og ved å oppdimensjonere denne forankringen til å motstå de hydrodynamiske lastene på Egget<sup>®</sup> vil man kunne integrere konstruksjonen i allerede etablerte oppdrettsanlegg.

-Denne siden skal være blank-

## Forord

Denne masteroppgaven er skrevet som en del av det femårige integrerte masterprogrammet Havteknologi ved Institutt for fysikk og teknologi ved Universitetet i Bergen (UiB) høsten 2022 og våren 2023. Denne oppgaven inngår i et samarbeid mellom Universitetet i Bergen og Høgskulen på Vestlandet (HVL) og er den avsluttende oppgaven for studieretningen marine installasjoner. Prosjektet er også gjennomført i samarbeid med bedriften Ovum AS, som har designet og utviklet Egget<sup>®</sup>.

Jeg ønsker å takke veilederne mine, førsteamanuensis Gloria Stenfelt (HVL), førsteamanuensis Harald Totland (UiB) og MSc. Halvor Larsson Aga for god oppfølging og veiledning gjennom hele masterperioden. En takk må også rettes til førstelektor Thore Clifford Thuestad for god hjelp med programvaren Sesam.

Videre ønsker jeg å takke hele teamet hos Ovum, med Åsmund Hellesøy i front, for muligheten til å være med å bidra til utviklingen av Egget<sup>®</sup>. De har lagt til rette for gode diskusjoner og jeg har fått vært med å besøke produksjonen av pilot-Egget<sup>®</sup> som nå er sjøsatt på Gjermundnes.

Til slutt må også medstudentene mine takkes for fem fantastiske år som student ved Universitetet i Bergen. Spesielt Frida Klaussen som har skrevet en parallell masteroppgave om forankring av Egget<sup>®</sup>. Hun har bidratt til gode samtaler og eksperimentelle resultater som blir brukt til validering av de numeriske beregningene.

-Denne siden skal være blank-

# Innhold

<b>Sammendrag</b>	<b>ii</b>
<b>Forord</b>	<b>iv</b>
<b>1 Innledning</b>	<b>1</b>
1.1 Bakgrunn . . . . .	1
1.2 Problemstilling og målsetting . . . . .	3
<b>2 Teoretisk bakgrunn</b>	<b>5</b>
2.1 Hydrostatikk . . . . .	5
2.1.1 Initialstabilitet, ved $\phi < 5^\circ$ . . . . .	5
2.1.2 Fri væskeoverflate . . . . .	7
2.2 Bølgeteori . . . . .	9
2.2.1 Regulære bølger . . . . .	9
2.2.2 Lineær potensialteori . . . . .	10
2.2.3 Irregulære bølger . . . . .	10
2.3 Bevegelsen til en flytende konstruksjon . . . . .	12
2.3.1 Bevegelsesligningen . . . . .	13
2.3.2 Responsstatistikk og RAO . . . . .	14
2.4 Bølgelaster . . . . .	15
2.4.1 Morison-teori . . . . .	15
2.4.2 Diffraksjonsteori . . . . .	15
2.5 Forankring . . . . .	16
2.5.1 Forankringssystem . . . . .	16
2.5.2 Forankringsteori . . . . .	20
2.5.3 Kjedelineformlene - statisk tilnærming . . . . .	22
2.5.4 Stivhet . . . . .	24
2.6 Skalering . . . . .	26
2.7 Regelverk og standarder . . . . .	26
2.7.1 Norsk standard for flytende oppdrettsanlegg, NS9415 . . . . .	26
<b>3 Numerisk metode</b>	<b>29</b>
3.1 Egget's dimensjoner . . . . .	30
3.2 Numerisk programvare . . . . .	32

3.3	Modellering i GeniE . . . . .	34
3.4	Hydrostatikk . . . . .	35
3.5	Hydrodynamisk analyse . . . . .	37
3.5.1	Mesh-studie . . . . .	40
3.6	Forankringsanalyse . . . . .	41
3.6.1	Sjøtilstand . . . . .	41
3.6.2	Forenklet rammefortøyning . . . . .	42
3.6.3	Fullstendig rammefortøyning . . . . .	44
3.6.4	Ettpunktsforankring . . . . .	46
3.7	Databehandling/postprosessering . . . . .	48
<b>4</b>	<b>Resultat</b>	<b>49</b>
4.1	Forankringsanalyse 1 - Forenklet fortøyningssystem . . . . .	51
4.2	Forankringsanalyse 2 - Fullstendig rammefortøyning . . . . .	56
4.3	Forankringsanalyse 3 - Ettpunktsforankring . . . . .	59
4.4	Sammenligning av rammefortøyning og ettpunktsforankring . . . . .	62
4.4.1	Sammenligning av RAO <0.1 Hz . . . . .	62
4.4.2	Sammenligning av RAO 0.1-1 Hz . . . . .	63
4.4.3	Global forskyvning og arealbeslag . . . . .	65
4.5	Feilkilder . . . . .	66
<b>5</b>	<b>Konklusjon</b>	<b>67</b>
<b>6</b>	<b>Videre arbeid</b>	<b>69</b>
	<b>Referanser</b>	<b>70</b>
	<b>Vedlegg</b>	<b>74</b>



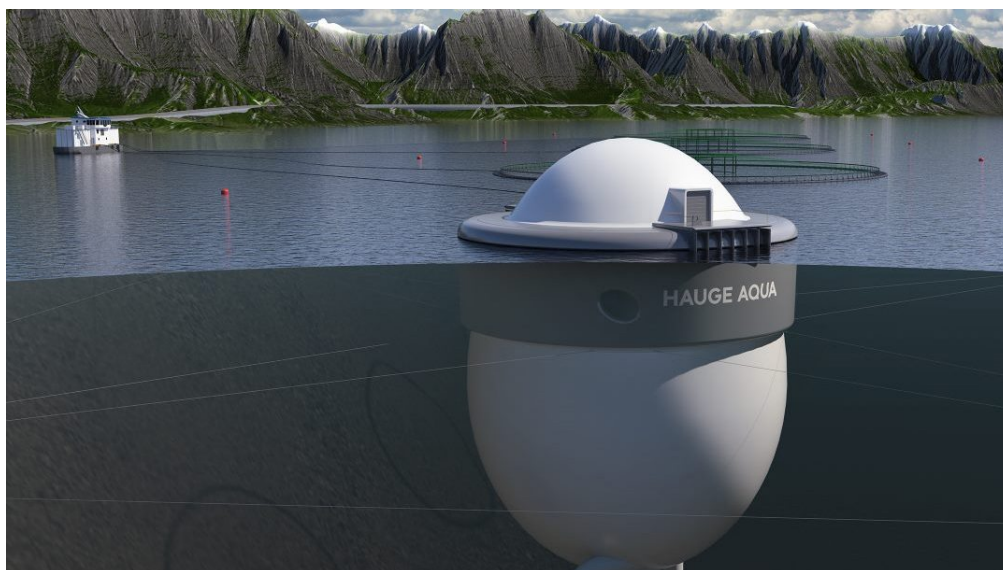
# 1 Innledning

## 1.1 Bakgrunn

De siste 50 årene har havbruksindustrien vokst til å bli en av de viktigste næringene i Norge. I 2022 eksporterte Norge 2.9 millioner tonn sjømat til en verdi av 151.4 milliarder kroner, hvor mesteparten av eksportvolumet bestod av laks fra oppdrett langs norskekysten [1]. Regjeringen har satt som mål å femdoble produksjon av norsk laks og ørret innen 2050. For å nå dette målet gav regjeringen næringen mulighet til å søke om utviklingstillatelse for å teste ut nye innovative løsninger for lakseoppdrett. Utviklingstillatelsene er en midlertidig særtillatelse som ble tildelt forskjellige prosjekter som bruker innovativ teknologi og som trenger betydelige investeringer [2]. Et av disse prosjektene er den lukkede akvakulturenheten Egget<sup>®</sup>, som er utviklet av Ovum AS. Egget<sup>®</sup> fikk tildelt 6 utviklingstillatelse og sammen med Hofseth International AS er det planlagt å sette 5 enheter i produksjon [3].

Egget<sup>®</sup> er en lukket oppdrettsenhet som skiller seg ut fra tradisjonelle oppdrettsmerder på flere måter. Et tradisjonelt oppdrettsanlegg består i dag av en fôrflåte og merder, hvor hovedkomponentene i merdene er flytering, notpose og fortøyning. Fisken oppholder seg i notposen som er festet i flyteringen, og både notposen og flyteringen kan variere i størrelse og utforming. Figur 1 viser et oppdrettsanlegg med flyteringer i bakgrunnen og Egget<sup>®</sup> i front. Felles for tradisjonelle merder er at notposene sørger for god vanngjennomstrømning, som fører til god vannkvalitet. De negative sidene med en slik løsning er at laksen blir eksponert for lus og alger, og det er utfordrende å samle opp fôrrester og bunnslam. Dette er noen av problemene Ovum vil løse ved Egget<sup>®</sup>.

Hovedforskjellen mellom Egget<sup>®</sup> og oppdrettsmerder er at Egget<sup>®</sup> har et fysisk skille mellom det indre og ytre vannvolumet. Ved å ha en lukket innhegning vil man kunne løse flere av utfordringene knyttet til lus og alger, oppsamling av slam og fôrspill samt få bedre arealutnyttelse. Man vil også kunne kontrollere vannkvaliteten inne i innhegningen for å optimalisere vekstforholdene og bedre fiskevelferden [4].



Figur 1: Tradisjonelt havbruksanlegg med Egget i front [5]

Lukkede konstruksjoner for oppdrett av laks er et relativt nytt konsept og det er flere nye problemstillinger knyttet til de hydrodynamiske egenskapene til disse storvolum konstruksjonene. I artikkelen "Comparative investigation: Closed versus semi-closed vertical cylinder-shaped fish cage in waves" sammenlignes de hydrodynamiske egenskapene til en lukket sylindrisk merdkonstruksjon mot en semi-lukket merdkonstruksjon som er åpen i bunn [6]. Her konkluderes det blant annet med at bevegelsen i jag er tilnærmet den samme, men i hiv ble det observert mye mindre bevegelse på den lukkede enheten sammenlignet med den semi-lukkede. For stampbevegelsen var det mye større respons i den semi-lukkede enheten, trolig på grunn av lave metasentrisk høyde. En annen problemstilling ved lukkede enheter er bevegelsen til det indre vannvolumet (sloshing) og hvordan dette påvirker den overordnede responsen til konstruksjonen. I artikkelen "Numerical study of closed rigid fish cages in waves and comparison with experimental data" konkluderes det blant annet med at "sloshing" påvirker bevegelsen i jag og stamp i stor grad [7].

Ved fortøyning av tradisjonelle oppdrettsanlegg i dag blir det oftest brukt rammefortøyning. Dette sørger for godt samspill mellom alle elementene som inngår i et lakseoppdrett, samtidig som det er et velutprøvd og relativt billig fortøyningssystem. Ved å ha en lukket produksjonsenhet som Egget<sup>®</sup>, vil det være mulig å ta i bruk andre fortøyningsmetoder som ikke er like utbredt i havbruksnæringen. SINTEF Fiskeri og havbruk utførte i perioden 2002-2005 prosjektet "Nye rømningssikre merdkonsept", hvor de blant annet så på alternative forankringsmetoder av tradisjonelle oppdrettsmerder [8]. I rapporten "Svaiforankring av oppdrettsanlegg" ble det sett på mulighetene for å forankre oppdrettsanlegg med kun ett

innfestningspunkt på konstruksjonen. Det ble her konkludert med at ettpunktsforankring er en tiltalende forankringsløsning, men det må tas ekstra høyde for risiko for brudd i forankringslinen [9]. I SINTEF's rapport "Sikre og mindre arealkrevende fortøyningsystem for havbruksanlegg" fra 2012 konkluderes det derimot med at svaiforankring ikke er en realistisk løsning for datidens oppdrettsanlegg, men at forankringsmetoder og teknologi som er brukt i olje- og gassindustrien kan brukes til forankring av oppdrettsanlegg [10].

## 1.2 Problemstilling og målsetting

Ved fortøyning av et akvakulturanlegg er det flere hensyn som må tas med tanke på arealbeslag, vedlikehold, samspill mellom konstruksjonselementer og kostnad. Konstruksjonen Egget<sup>®</sup> har helt andre egenskaper enn en oppdrettsmerd, hvor den største forskjellen er nettopp dette med at Egget<sup>®</sup> er en storvolum konstruksjon som tar opp enda større hydrodynamiske laster enn en oppdrettsmerd. En tradisjonell merd er også fleksibel og vil bevege seg sammen med bølgehevingen, som fører til en mer dynamisk bevegelse. Egget<sup>®</sup> er ikke fleksibel, og man må i tillegg ta hensyn til bevegelsen til det indre vannvolumet i forhold til konstruksjonens respons og fiskens helse og velferd. I denne oppgaven skal det gjennomføres numeriske analyser av forskjellige fortøyningsystem for Egget<sup>®</sup>, for å finne ut hvilke muligheter man har ved fortøyning av en lukket merdkonstruksjon sammenlignet med en tradisjonelle forankringsmetoder i havbruksnæringen. Vil det være hensiktsmessig å ta i bruk andre fortøyningsystem enn rammefortøyning?

Første del av oppgaven vil bestå av en numerisk analyse av en forenklet rammefortøyning som skal valideres mot eksperiment fra en parallell masteroppgave, før det i neste omgang skal gjennomføres en fortøyningsanalyse av en fullstendig rammefortøyning for Egget<sup>®</sup>. Hensikten med dette er å danne et mer globalt bilde på hvordan responsen til konstruksjonen er når det er forankret til havbunnen. Til slutt vil det bli introdusert et konsept av en ny fortøyningsløsning som skal analyseres og sammenlignes med tradisjonell rammefortøyning og eksperimentelle forsøk med hensyn til relevante krav og operasjonelle aspekter.

Målet med oppgaven er å vurdere ulike fortøyningsarrangement i henhold til relevante standarder og kriterier, sammenligne resultatene med eksperimentelle forsøk og relevant litteratur samt gi en basis for valg av fortøyningsystem for Egget<sup>®</sup> og videre arbeid med konseptet. De eksperimentelle resultatene er hentet fra en parallell masteroppgave [11], men skalert til full skala for å kunne bruke dem i denne oppgaven.

-Denne siden skal være blank-

## 2 Teoretisk bakgrunn

I dette kapittelet blir teorien som blir brukt i oppgaven presentert. Teorien er delt inn i flere underkapitler hvor hydrostatikk, hydrodynamikk og forankringsteori blir gjennomgått. Dette danner en basis på hvilke teorier de numeriske programvarene legger til grunn for å beregne bevegelsen og lastene til Egget<sup>®</sup>. Relevante kriterier fra standarden NS9415, som er gjeldene for flytende akvakulturenheter, blir også presentert.

### 2.1 Hydrostatikk

En konstruksjon som er nedsenket i sjøen vil bli påvirket av indre og ytre laster. For å forhindre at konstruksjonen kantrer er det viktig at konstruksjonen kan motstå disse lastene, da vil man oppnå stabilitet. I dette kapittelet blir hydrostatikk og stabilitet gjennomgått. Her opererer man i en statisk situasjon, og antar at det ikke virker dynamiske krefter på konstruksjonen. Hydrostatikken beskriver hvordan det hydrostatiske trykket i stillestående vann virker på den ytre overflaten til en nedsenket konstruksjon. Dette er bakgrunnen for Arkimedes lov om oppdrift. Oppdriftskraften,  $F_{\nabla}$ , er gitt ved  $F_{\nabla} = \rho g \nabla$  hvor  $\rho$  er tettheten til væsken,  $g$  er tyngdeakselerasjonen og  $\nabla$  er volumdeplasementet. En flytende konstruksjon er i statisk likevekt når resultatet av kreftene som virker på konstruksjonen er lik null og at summen av momentene er lik null. Dette gir

$$\begin{aligned}\Delta g &= \nabla \rho g \\ \Delta &= \nabla \rho\end{aligned}\tag{1}$$

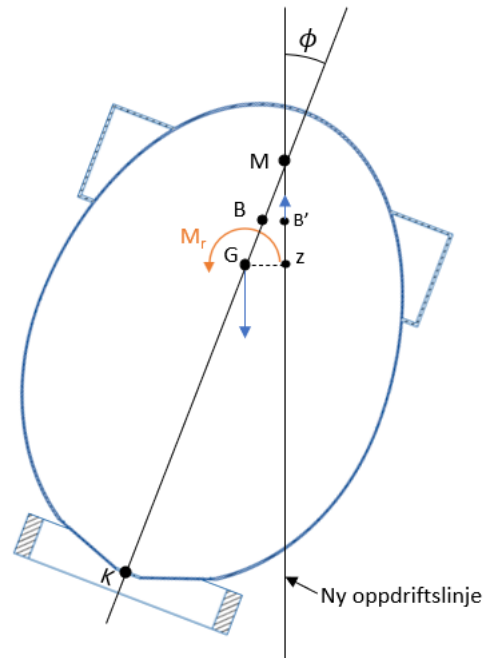
hvor  $\Delta$  er massedeplasementet [12].

#### 2.1.1 Initialstabilitet, ved $\phi < 5^\circ$

Når en konstruksjon blir utsatt for indre eller ytre laster vil konstruksjonen krenge med en vinkel  $\phi$ , vist ved Figur 2. Den statiske stabiliteten til en konstruksjonen omfatter konstruksjonens evne til å rette seg opp igjen når den blir påvirket av slike laster, og at den finner tilbake til likevektsposisjonen [12].

For å definere en konstruksjons stabilitet trenger man å definere noen geometriske punkter. Oppdriftssenteret,  $B$ , er volumsenteret av konstruksjonens neddykkede volum. Tyngdepunktet,  $G$ , er konstruksjonens massesenter og flotasjonsenteret,  $F$ , er arealsenter av vannlinjearealet,  $A_v$ . Konstruksjonens kjøll,  $K$ , ligger i punktet  $z=0$  i det lokale koordinatsenteret.

Metasenteret,  $M$ , er skjæringspunktet mellom oppdriftslinjene når konstruksjonen krenger med en vinkel  $\phi$  [13]. Dette er vist ved Figur 2.



Figur 2: Stabilitet ved små krengevinkler [13]

Når konstruksjonen krenses oppstår det et krenagemoment mellom oppdriften og tyngden av skipet. Vektarmen til dette momentet kalles  $\overline{GZ}$ , når metasenteret ligger over tyngdepunktet dannes det et opprettende moment rundt tyngdepunktet, vist ved Figur 2. På grunn av krengevinkelen vil oppdriftssenteret endres til  $B'$ . For å oppnå stabilitet ved en gitt krengevinkel må krenagemomentet være lik det rettende momentet. Figur 2 viser en skisse av dette.

Ved å sette krenagemomentet lik det opprettede momentet kan man utlede et uttrykk for konstruksjonens rettende moment, vist ved Formel (2) til (3), hvor  $M_r$  er rettende moment og  $M_k$  er krenagemoment.

$$M_r = M_k \quad (2)$$

$$M_r = \rho g \nabla \overline{GZ} \quad (3)$$

Vektarmen til det rettende momentet til konstruksjonen ved små vinkler kan uttrykkes som

$$\overline{GZ} = \overline{GM} \sin \phi \quad . \quad (4)$$

Dette gir at det rettende momentet kan uttrykkes ved følgende formel

$$M_r = \rho g \nabla \overline{GM} \sin \phi \quad . \quad (5)$$

Denne sammenhengen gjelder som nevnt ved små krengevinkler og at metasenteret står i ro. Ved større vinkler vil det neddykkede volumet endre seg mer drastisk og formlene må baseres på et annet fast sted på konstruksjonen [13].  $\overline{GZ}$  kurven blir i denne oppgaven brukt i til p definere Egget's stabilitet og blir beregnet i SESAM ved hjelp av programvaren HydroD.

Metasenteret er skjæringspunktet mellom ordinær oppdriftslinje og ny oppdriftslinje ved krenkning. Ved å introdusere den geometriske sammenhengen mellom gravitasjonssenteret, oppdriftssenteret og metasenteret kan et uttrykk for avstanden mellom metasenter og gravitasjonssenter,  $\overline{GM}$ , utledes. Dette er vist ved

$$\begin{aligned} \overline{GM} &= \overline{KM} - \overline{KG} \\ \overline{GM} &= \overline{KB} + \overline{BM} - \overline{KG} \quad , \end{aligned} \quad (6)$$

hvor  $\overline{KB}$  er avstanden fra kjølen til oppdriftsenteret og avhenger av den nedsenkede geometrien til konstruksjonen.  $\overline{KG}$  er avstanden fra kjølen til gravitasjonssenteret og avhenger av konstruksjonens massedistribusjon.  $\overline{KM}$  er avstanden fra kjøle til metasenteret og  $\overline{BM}$  er avstanden mellom oppdriftsenter og metasenter.  $\overline{BM}$  er gitt ved

$$\overline{BM} = \frac{I_{Aw}}{\nabla} \quad , \quad (7)$$

hvor  $I_{Aw}$  er arealtreghetsmomentet til vannlinjeartelet [13].

### 2.1.2 Fri væskeoverflate

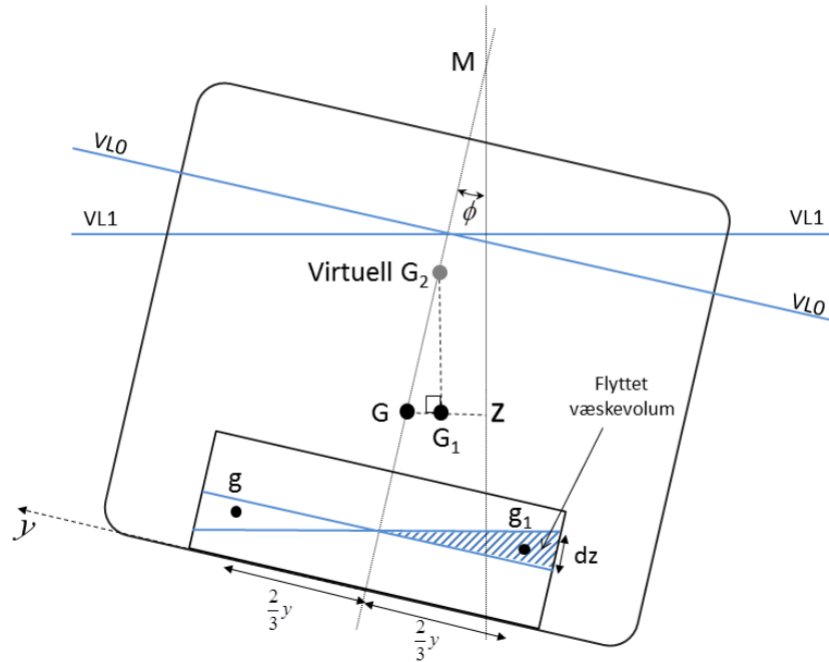
Fri væskeoverflate kan ha mye å si for de hydrostatiske egenskapene og stabiliteten til konstruksjonen. I denne oppgaven blir det antatt at Egget<sup>®</sup> er helt lukket, og man må ta hensyn til den frie væskeoverflaten ved beregning av  $\overline{GM}$ . Når man påfører en konstruksjon med fri væskeoverflate et ytre moment vil den frie væskeoverflaten holde seg horisontal. Dette fører til en endring i gravitasjonssenteret,  $G_1$ , og man må korrigere for dette ved å ta hensyn til det virtuelle tyngdepunktet  $G_2$ . Dette er vist i Figur 3. Ved å beregne tyngdepunktforskyvningen grunnet flyttet væske inni legemet, og ved å anta små vinkler, kan man utlede at fri væske

overflate effekt blir

$$\overline{GG_2} = \frac{i\rho_v}{\Delta} \quad , \quad (8)$$

hvor  $i$  er arealtrehetsmomentet til den fri væskeoverflaten og  $\rho_v$  er tettheten til den indre væsken [13]. Formelen for  $\overline{GM}$  med korreksjon for fri væskeoverflate blir da

$$\overline{GM} = \overline{KB} + \overline{BM} - (\overline{KG} + \overline{GG_2}) \quad . \quad (9)$$

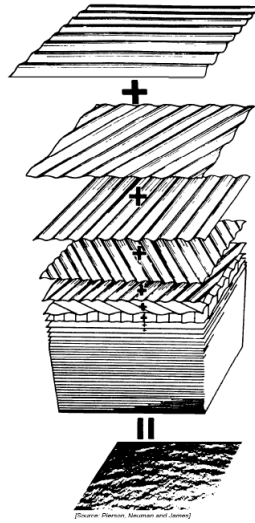


Figur 3: Korreksjon fri væskeoverflate [13]



## 2.2 Bølgeteori

Et av de største kraftbidragene som påvirker flytende konstruksjoner kommer fra bølger. Bølgene opptrer periodisk, noe som fører til at kraften som opptrer på konstruksjonen også er periodisk. Bølgene kan deles inn i to hovedgrupper, regulære og irregulære bølger. Regulære bølger opptrer med lik amplitude og periode, irregulære bølger derimot har en varierende amplitude og periode, og kan sees på som summen av flere regulære bølger med forskjellig fase, periode, retning og amplitude, vist ved Figur 4 [14]. I denne oppgaven brukes regulære bølger i den hydrodynamiske analysen, og i forankringsanalysene blir det brukt irregulære sjøtilstander.



Figur 4: Irregulær sjøtilstand satt sammen av flere regulære bølger [14].

### 2.2.1 Regulære bølger

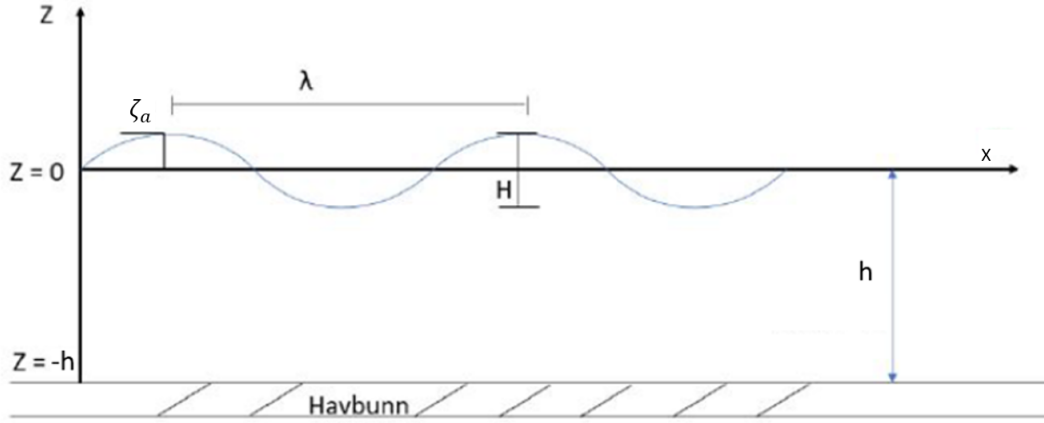
Regulære bølger baserer seg på potensial strømmingsteori. Man kan se på regulære bølger som en funksjon av sinus eller cosinus, hvor bølgene opptrer som harmoniske svingninger. Figur 5 viser en regulær bølge som funksjon av posisjon,  $x$ , hvor  $H$  er bølgehøyden,  $\lambda$  er bølgelengden,  $h$  er vanddybden og  $\zeta$  er overflateheving. Formel (10) gir en fullstendig matematisk beskrivelse av en regulær bølge i tid og rom

$$\zeta(x, t) = \zeta_a \cos(kx - \omega t) \quad , \quad (10)$$

hvor  $\zeta_a$  er bølgens amplitude. Siden sinus og cosinusbølger blir uttrykt ved vinkel må bølgelengde ( $\lambda$ ) og periode ( $T$ ) konverteres til vinkler, gitt ved følgende uttrykk

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad , \quad \omega = \frac{2\pi}{T} \quad ,$$

her er  $k$  bølgetallet og  $\omega$  vinkelfrekvensen [15].



Figur 5: Regulær bølge [16]

### 2.2.2 Lineær potensialteori

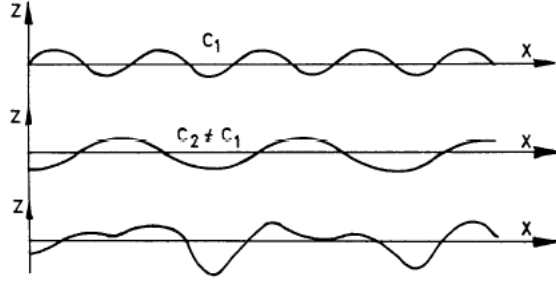
For å kunne fastslå kreftene som virker fra bølger på en konstruksjon er det nødvendig å beskrive hvordan vannpartiklene påvirker konstruksjonen. Ved å bruke lineær potensialteori, Laplace ligningen, kan horisontal og vertikal partikkelhastighet og -akselerasjon, samt dynamisk trykk beregnes ved hjelp av hastighetspotensialet. For å kunne benytte seg av lineær potensialteori for bølger er det nødvendig å anta at bølgene har en lav stigning. Da kan man anta at partikkelhastigheten, partikkelakselerasjonen og det dynamiske trykket opptrer lineært i forhold til bølgehevingen [12]. Ved å løse Laplace ligningen med gjeldende grensebetingelser for havbunnen, konstruksjonens overflate og havoverflaten kan et generelt uttrykk for hastighetspotensialet  $\Phi$  utledes ved

$$\Phi(x, z, t) = \frac{\zeta_a g}{\omega} \frac{\cosh(k(z+h))}{\cosh(kh)} \cos(\omega t - kx) \quad . \quad (11)$$

### 2.2.3 Irregulære bølger

Bølgene som observeres på sjøen opptrer ikke som regulære, men som irregulære bølger med varierende bølgehøyde og periode. De irregulære bølgene kan beskrives matematisk ved å se på dem som en sum av regulære bølger, noe som kalles lineær superposisjon av forskjellige bølgebidrag. Hver regulære bølgene har en tilfeldig faseforskyvning som sammen utgjør en

irregulær sjøtilstand. Figur 6 viser superposisjon til to harmoniske bølger med samme retning, hvor amplituden antas å være Rayleigh-fordelt. Ved å inkludere flere bølger med forskjellig retning vil man kunne få et realistisk bilde på en irregulær sjøtilstand [12].



Figur 6: Superposisjon til to harmoniske bølger [12]

For å beskrive en korttids irregulær sjøtilstand er det vanlig å anta at vannoverflaten beveger seg stasjonært i en periode opptil 3 eller 6 timer. Ved en slik stasjonær sjøtilstand kan man definere sentrale parametere som signifikant bølgehøyde,  $H_s$ , og pik-perioden,  $T_p$ . Den signifikante bølgehøyden er definert som gjennomsnittshøyden til de tredjedels høyeste bølgene, og kan også noteres som  $H_{1/3}$ . Pik-perioden er bølgenes periode bestemt ved den inverse frekvensen til bølgespekteret ved maks energimengde. Standardiserte bølgespektre beskriver en irregulær sjøtilstand ved en statistisk spektralanalyse, kalt PSD funksjon (power spectral density) av overflatehevingen, og beskriver mengden energi i en sjøtilstand som funksjon av frekvens [17]. Det finnes flere forskjellige bølgespektre, hvor Pierson-Moskowitz og Joint North Sea Wave Project (JONSWAP) spektrum er to av dem. Pierson-Moskowitz er i følge DNV [18] gitt ved

$$S_{xx,PM}(\omega) = \frac{5}{16} H_s^2 \omega_p^4 \omega^{-5} \exp\left(-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}\right), \quad (12)$$

hvor  $\omega$  er bølgens vinkelfrekvens og  $\omega_p$  er spekterets topp-vinkelfrekvens gitt ved  $\omega_p = \frac{2\pi}{T_p}$ . I denne oppgaven er det brukt JONSWAP spekter som er gitt ved

$$S_{xx,J}(\omega) = A_\gamma S_{xx,PM}(\omega) \gamma^{\exp\left(-0.5\left(\frac{\omega-\omega_p}{\sigma\omega_p}\right)\right)}. \quad (13)$$

Normaliseringsfaktoren,  $A_\gamma$ , er gitt som  $A_\gamma = 1 - 0.287 \ln(\gamma)$ , hvor  $\gamma$  er spekterets ikke-dimensjonale spissparameter og  $\sigma$  er spekterets breddeparameter [18]. Momentene til bølgespekteret kan brukes til å regne ut sentrale parametere fra en gitt sjøtilstand. Formlene for disse momentene er hentet fra DNV-RP-C205 [17], og er gitt ved følgende uttrykk.

Nullte moment:

$$M_0 = \int_0^\infty S_{xx}(\omega) d\omega \quad (14)$$

Første moment:

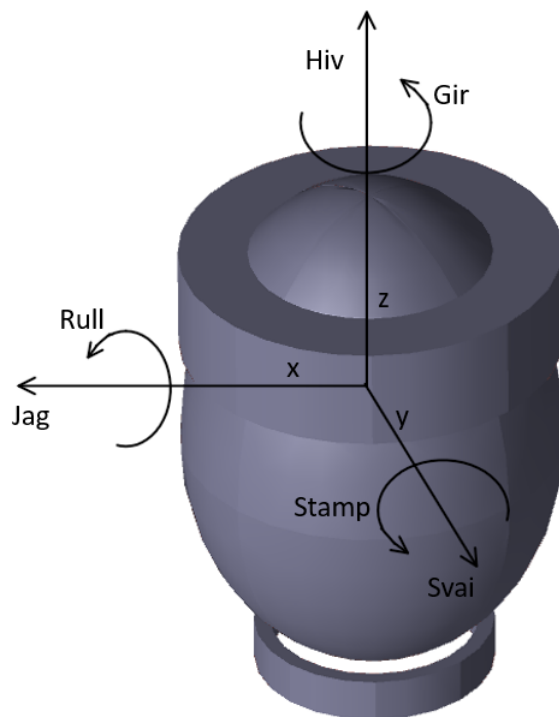
$$M_1 = \int_0^\infty \omega S_{xx}(\omega) d\omega \quad (15)$$

Andre moment:

$$M_2 = \int_0^\infty \omega^2 S_{xx}(\omega) d\omega \quad (16)$$

### 2.3 Bevegelsen til en flytende konstruksjon

Bevegelsen til en flytende konstruksjon i sjøen blir påvirket av ytre krefter fra bølger og strøm. For å kunne analysere disse bevegelsene må bevegelsesretningene defineres. Den tre-dimensjonale bevegelsen kan beskrives ved hjelp av de seks frihetsgradene. Disse består av tre translasjoner i henholdsvis  $x$ ,  $y$  og  $z$  retning i forhold til konstruksjonens lokale koordinatsystem og rotasjoner rundt hver av aksene. Dette er vist ved Figur 7.



Figur 7: De seks frihetsgradene

De oscillerende translasjonene kalles jag, svai og hiv, og har notasjonen  $\eta_1$ ,  $\eta_2$  og  $\eta_3$ . Rotasjonene kalles rull, stamp og gir og har notasjonen  $\eta_4$ ,  $\eta_5$  og  $\eta_6$  [14]. Ved å anta små bevegelser, kan man skrive den sammensatte bevegelsen av et punkt på konstruksjonen som

$$\mathbf{s} = \eta_1 \mathbf{i} + \eta_2 \mathbf{j} + \eta_3 \mathbf{k} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r} \quad ,$$

hvor  $\eta_1$ ,  $\eta_2$  og  $\eta_3$  er vektorer langs x-, y-, og z-aksen.  $\boldsymbol{\omega}$  og  $\mathbf{r}$  er gitt ved

$$\vec{\omega} = \eta_4 \mathbf{i} + \eta_5 \mathbf{j} + \eta_6 \mathbf{k} \quad ,$$

$$\mathbf{r} = x \mathbf{i} + y \mathbf{j} + z \mathbf{k} \quad .$$

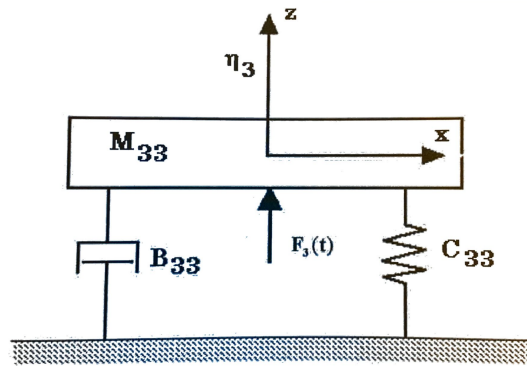
Regner man ut kryssproduktet mellom  $\boldsymbol{\omega}$  og  $\mathbf{r}$  kan man uttrykke  $\mathbf{s}$  ved følgende uttrykk

$$\mathbf{s} = (\eta_1 + z\eta_5 - y\eta_6) \mathbf{i} + (\eta_2 + x\eta_6 - z\eta_4) \mathbf{j} + (\eta_3 + y\eta_4 - x\eta_5) \mathbf{k} \quad . \quad (17)$$

Hvert ledd i Formel (17) beskriver bevegelsen i de respektive retningene i konstruksjonens lokale koordinatsystem.

### 2.3.1 Bevegelsesligningen

Man kan se på bevegelsen til en konstruksjon som et svingesystem med en masse, en dempning og en fjær. Dette er vist ved Figur 8 for frihetsgraden hiv. Bevegelsene i de seks frihetsgradene kan opptre uavhengig av hverandre, men generelt vil det være koblinger mellom dem.



Figur 8: Svingesystem med masse, dempning, fjær og ytre kraft [15]

Tar man i bruk Newtons 2. lov på dette systemet vil man få en kraftlikevekt, hvor summen av treghetskraft, dempningskraft og fjærkraften blir de ytre kreftene som virker på konstruksjonen. Hvert ledd utgjør en  $6 \times 6$  matrise, hvor kraftlikevekten kan uttrykkes ved

$$\sum_{n=1}^6 [(\mathbf{M}_{nj} + \mathbf{A}_{nj})\ddot{x}_n + \mathbf{B}_{nj}\dot{x}_n + \mathbf{C}_{nj}x] = \sum F_j(t) \quad (j = 1, 2, \dots, 6) \quad . \quad (18)$$

Her representerer  $\ddot{x}$ ,  $\dot{x}$  og  $x$  akselerasjon, hastighet og posisjon.  $(\mathbf{M}_{nj} + \mathbf{A}_{nj})$  konstruksjonens masse og tilleggs masse, som sammen med  $\ddot{x}$  utgjør treghetskraften til konstruksjonen.  $\mathbf{B}_{nj}$  representerer konstruksjonens dempning og  $\mathbf{C}$  er konstruksjonens stivhet. Eksitasjonskraften  $F_j(t)$  er summen av kreftene som virker i den respektive frihetsgraden  $j$  [15].

### 2.3.2 Responstatistikk og RAO

På samme måte som korttids bølgestatistikk gir et bølgespektrum hvor bølgehøyden er Rayleighfordelt, kan man også finne korttids statistikk til konstruksjonens respons i en irregulær sjøtilstand. For å kunne beregne et responsspekter som viser konstruksjonens bevegelse i en gitt sjøtilstand, trenger man et definert bølgespektrum, og en transferfunksjon. Denne transferfunksjonen kalles "Response Amplitude Operator" (RAO). Responsspektrumet er definert som energitettheten til strukturens respons med et bølgespektrum som input. For et lineært system er responsspekteret gitt ved

$$S_{yy}(\omega) = H(\omega)^2 S_{xx}(\omega) \quad , \quad (19)$$

hvor  $S_{yy}(\omega)$  er responsen og  $H(\omega)$  er transferfunksjonen. Man vil få et responsspektrum for hver frihetsgrad hvor enheten er  $[m^2s]$  for translasjonene og  $[deg^2s]$  for rotasjon [19]. I denne oppgaven regnes RAOene til konstruksjonen ut på to forskjellige måter. Ved å gjøre tidssimuleringer av konstruksjonens bevegelse kan man hente ut bølgehevingen og bevegelsen som funksjon av tid. Ved å bruke FFT, "Fast Fourier Transformation", kan man transformere resultatene fra tidsplanet til frekvensplanet og dermed finne energi-tetthets spektrumet [17]. Videre kan man løse Formel (19) for  $H(\omega)$  og få ut RAOen. Den andre metoden er å regne ut en teoretisk RAO ved å bruke første- og andregrads 3D potensialteori samt diffraksjonsteori. Til å løse dette blir programvaren WADAM brukt til å estimere de teoretiske transferfunksjonene [20].

Responsspektrumets momenter kan brukes til å regne variansen og standardavviket, hvor momentet er gitt ved

$$M_n = \int_0^\infty \omega^n S_{yy}(\omega) d(\omega) \quad . \quad (20)$$

Her er variansen  $\sigma^2 = M_0$  og standardavviket er  $\sigma = \sqrt{M_0}$ .

## 2.4 Bølgelaster

Det er viktig å kunne beregne kreftene som virker på en konstruksjon, hvor det kan skilles mellom statiske og dynamiske laster. De statiske kreftene kommer i hovedsak fra gravitasjonskrefter, ballastering, strøm og andre hydrostatiske laster. De dynamiske kreftene kommer fra varierende vind- og bølgelaster [21]. I denne oppgaven blir det ikke tatt hensyn til strøm og vind. Det skilles videre mellom slanke og storvolum-konstruksjoner, da det er forskjellige grenseverdier som må tas hensyn til og forskjellige teorier som brukes for å beregne lastene. Egget<sup>®</sup> er en storvolum-konstruksjon, mens lastene på forankringslinene må regnes ut ved å bruke teorien til slanke konstruksjoner.

### 2.4.1 Morison-teori

Morison's ligning blir brukt til å regne ut bølgekrefter på slanke konstruksjoner [22]. Denne teorien er mulig å bruke for å regne ut krefter som virker på forankringsliner, hvor linen blir diskretisert i mindre elementer. Den resulterende kraften på linen er gitt som

$$dF = \rho C_M V \dot{U} dl + \frac{1}{2} \rho A C_D U |U| dl \quad , \quad (21)$$

hvor  $\rho$  er tettheten til vann,  $C_M$  er masse koeffisient,  $V$  er volumet av nedsenket konstruksjon,  $\dot{U}$  er partikkelakselerasjon,  $A$  er arealet,  $C_D$  er drag koeffisient og  $U$  er partikkelhastigheten.  $l$  representerer lengden av forankringslinen.

### 2.4.2 Diffraksjonsteori

Når forholdet mellom bølgelengden og konstruksjonens diameter ( $\lambda/D$ ) er mindre enn fem kan man ikke bruke Morison's ligning til å kreftene på konstruksjonen. Man må da ta hensyn til tredimensjonal potensialteori og diffraksjon når man skal regne på de hydrodynamiske lastene. Potensialteorien fra Kapittel 2.2.2 brukes til å finne hastighetspotensialet til vannet ved overflaten av konstruksjonen, lastene kan videre beregnes ved å integrere trykket og spenningene over konstruksjonens overflate. Diffraksjon vil si at bølgene diffrakterer, eller bøyer eller separerer seg, rundt overflaten av konstruksjonen. Diffraksjonsteorien tar hensyn til interaksjonen mellom bølgene. Dette vil si at teorien inkluderer innkommende bølger, bølger som reflekteres og radiasjonsbølger fra konstruksjonens bevegelse. Konstruksjonens totale potensial,  $\Phi_t$ , kan regnes ut ved å summere potensialene for de innkommende bølgene,  $\Phi_i$ , diffraksjon,  $\Phi_d$  og radiasjon,  $\Phi_r$ , for hver av de seks frihetsgradene [15]. Det totale potensialet er gitt ved

$$\Phi_t = \sum_{n=1}^6 (\Phi_{in} + \Phi_{dn} + \Phi_{rn}) \quad . \quad (22)$$

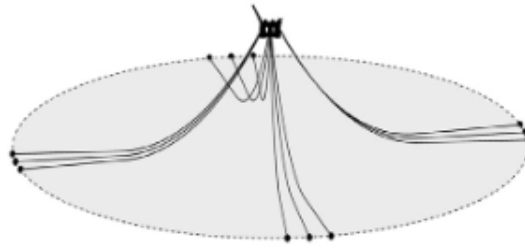
## 2.5 Forankring

Forankringssystemet til en konstruksjon har som hovedfunksjon å holde konstruksjonen posisjonert på en bestemt lokasjon i en gitt operasjonstid. I tillegg til å holde konstruksjonen i posisjon skal forankringen kunne motstå miljøkreftene som konstruksjonen blir utsatt for. Det finnes flere typer forankringssystem og -metoder, hvor alle har til hensikt å sørge for godt samspill mellom konstruksjonens bevegelser og posisjonering med hensyn til de operasjonelle oppgavene til konstruksjonen [23]. Ved dimensjonering av fortøyningsystem er det flere faktorer som må tas hensyn til, hvor de viktigste er miljøkreftene, konstruksjonens utforming og egenskaper, operasjonelle aspekter og kostnad. I dette kapitlet blir fortøyningsystemene og grunnleggende forankringsteori som er relevant for denne oppgaven gått igjennom. Det er også verdt å merke seg at kostnadene ved de forskjellige konseptene ikke blir tatt hensyn til i denne oppgaven.

### 2.5.1 Forankringssystem

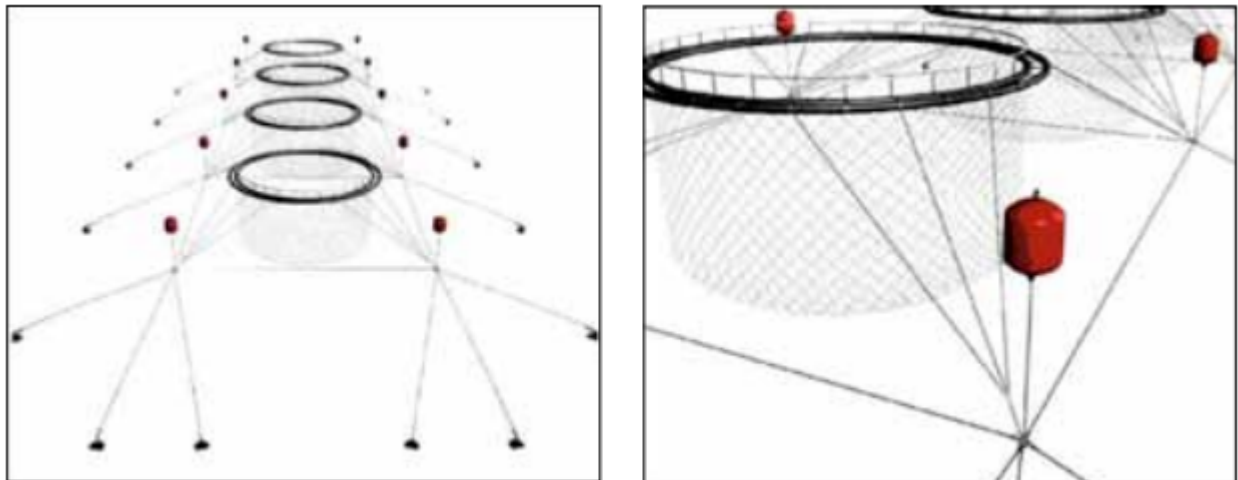
Som nevnt innledningsvis finnes det flere typer forankringssystemer, blant disse er slakklineforankring. Her bidrar linens egenvekt til å holde konstruksjonen i posisjon. Dette er vist ved Figur 9. Her ser man at når konstruksjonen ligger i likevektposisjon ligger mye av forankringslinen på sjøbunnen. Når miljøkrefter påvirker linen og konstruksjonen vil linens egenvekt og stivhet fungere som en motstående kraft, og redusere konstruksjonens dynamiske bevegelse [23]. Forankringslinene kan være sammensatt av flere segment med ulikt materiale. For å oppnå tilstrekkelig vekt brukes kjetting på det nederste segmentet av forankringslinen. Dette vil bidra til høyere egenvekt og man tar hensyn til friksjon mot havbunnen. I området mellom havbunnen og overflaten er det normalt å bruke fibertau eller vaier. Dette er økonomisk gunstig og det er mindre fysiske påkjenninger på selve linen [24].





Figur 9: Slakklineforankring [23]

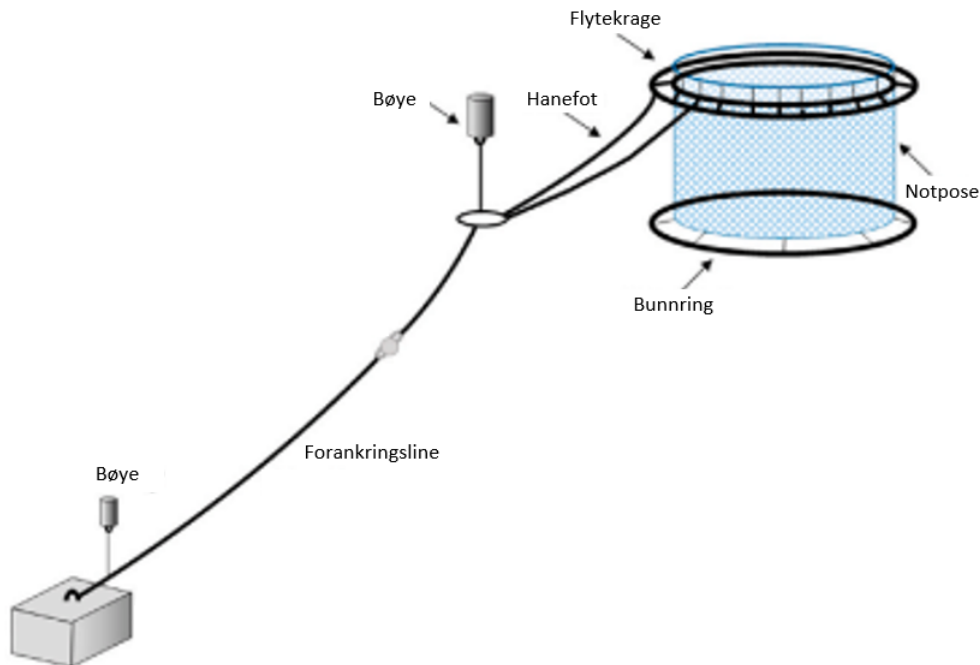
I havbruksnæringen er rammefortøyning den mest brukte forankringsmetoden. Rammefortøyningen består av flere elementer som sørger for god rømmingssikkerhet og godt samspill mellom forskjellige oppdrettsenheter. Tradisjonelle oppdrettsmerder er som nevnt i innledningen satt sammen av en flytekrage med en notpose hvor fisken oppholder seg. Flytekragen har relativt liten oppdrift, noe som må tas hensyn til ved forankring. Videre består systemet av en nedsenket ramme av tau med koblingspunkt i hvert hjørne. Flytekragen er festet til disse koblingspunktene ved hjelp av haneføtter av kjetting eller tau. Ved å bruke dette prinsippet kan flere flytekrager forankres i samme system, og det blir som et rutenett av fortøyningsrammer. Konseptet er vist i Figur 10, hvor man ser systemet med flere enheter satt sammen og hvordan koblingspunktene i hvert hjørne er utformet. I hvert koblingspunkt er det festet en oppdriftsbøye som bidrar til å redusere de vertikale kreftene inn mot flytekragen. Siden oppdriften til flytekragen er relativt lav ville forankringslinene kunne trekke kragen under vann uten oppdriftsbøyene. For å forankre rammene til havbunnen brukes slakklineforankring, med innfestning i hvert koblingspunkt [25].



Figur 10: Rammefortøyning

Det siste forankringssystemet som er relevant for denne oppgaven er ettpunktsforankring. Dette er et konsept som ikke er vanlig å bruke i havbruksnæringen da det kan være utfordrende å ivareta samspillet og rømmingssikkerheten med tradisjonelle merder, men kan ha styrkemessige fordeler [9]. I en rapport fra SINTEF fra April 2005 konkluderes det med at ettpunktsforankring kan være en tiltalende løsning, men at det må stilles høyere krav til kontroll av forankringslinens tilstand. Ettpunktsforankring vil også ta beslag på et større overflateareal, noe som ikke egner seg i fjordene hvor mange av dagens akvakulturanlegg er plassert [9].

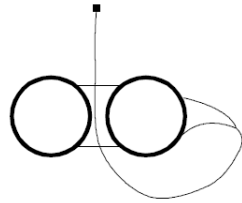
Prinsippet til ettpunktsforankring går ut på at én eller flere forankringslinjer er festet til konstruksjonen i ett felles innfestningspunkt. Dette fører til at konstruksjonen fritt kan rotere 360° og miljøkreftene blir tatt opp i ett felles punkt uansett retning på kreftene. Det finnes forskjellige typer ettpunktsforankringer, hvor man har svaiforankring og svivel-forankring (turret mooring) som hovedmetodene, vist ved Figur 11 og 13.



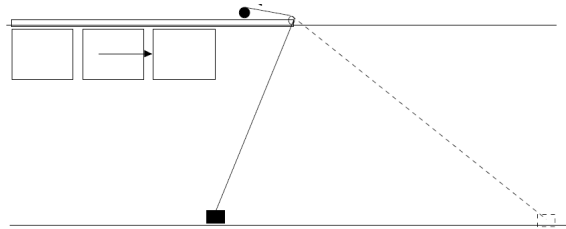
Figur 11: Svaiforankring, konsept [26]

Ved svaiforankring er konstruksjonen forankret til sjøbunnen med én line, og rotasjons-senteret blir på havbunnen. Siden man med dette systemet kun har én line, må det stilles høyere krav til sikkerheten mot brudd. Det kan argumenteres med at en økt materialfaktor

for forankringsline vil kunne redusere risikoen for linebrudd, eventuelt kan en løsning med sikkerhetsline utarbeides for å kunne tilfredstille kravene i Norsk standard for flytende akvakultur, NS9415 [9]. En annen problemstilling ved svaiforankring av flere enheter er at det kan oppstå en låst situasjon, hvor forankringslinen vikler seg inn mellom flyterne, vist ved Figur 12a. Det kan derfor være hensiktsmessig å utvikle en form for inntrekning av overskuddsline, som dynamisk regulerer lengden på forankringslinen ved endret bevegelsesretning. Et eksempel på dette er vist ved Figur 12b.



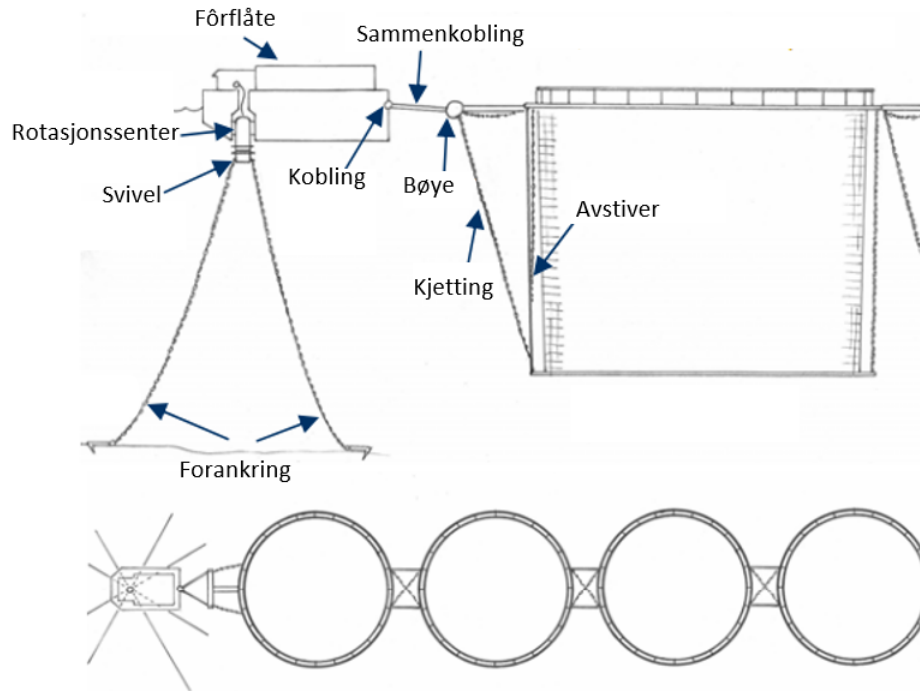
(a) Viklet svaiforankring [9]



(b) Svai med vinsj-konsept [9]

Figur 12: utfordringer ved svaiforankring

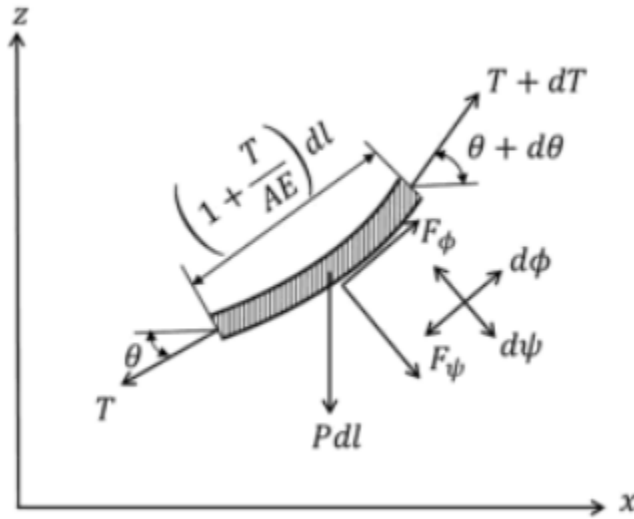
Med en svivel-forankring vil man flytte rotasjonssenteret opp mot vannoverflaten og man kan benytte flere forankringslinjer som samles i ett felles punkt. Ved et slikt system kan det utvikles et integrert system mellom fôrflåte og innhengninger. Dette vil kunne løse flere problemstillinger knyttet til samspillet mellom de forskjellige innhengningene, fôrflåte og operasjonelle oppgaver sammenlignet med svaiforankring. Selve forankringssystemet er mest brukt ved forankring av produksjonsskip i olje- og gassindustrien [23]. Prinsippet går ut på at forankringslinene er festet til en svivel, som fungerer som et stort kulelager. Selve konstruksjonen roterer med miljøkreftene rundt denne svivelen. Figur 13 viser hvordan et slikt konsept kan overføres til akvakulturanlegg, hvor svivelen er integrert i fôrflåten, og innhengningene er festet i et system til flåten.



Figur 13: Svivelforankring, konsept [9]

## 2.5.2 Forankringsteori

For å kunne forstå prinsippene bak forankringsteorien kan man ta utgangspunkt i ett enkelt element av fortøyningslinen i et todimensjonalt plan som vist i Figur 14 [23]. Her representerer  $P$  linens vekt per lengdeenhet i vann,  $T$  er linespenningen,  $l$  er linelengden og  $AE$  er aksialstivheten.  $d\psi(l)$  og  $d\phi(l)$  beskriver forskyvningen til linen normalt og tangentielt på fortøyningslinen.



Figur 14: Element av forstøyningsline i x-z planet [23]

Dersom man anser  $F_\psi$  og  $F_\phi$  som dekomponerte bidrag av den hydrodynamiske kraften som virker aksielt og normalt på elementet med en masse  $m$ , vil man få følgende sammenhenger i retningene  $\psi$  og  $\phi$

$$-T + (T + dT) \cos(d\theta) - P \sin(\theta)dl + F_\phi \left(1 + \frac{T}{AE}\right) dl = m \frac{d^2\phi(l)}{dt^2} \quad (23)$$

$$(T + dT) \sin(d\theta) - P \cos(\theta)dl - F_\psi \left(1 + \frac{T}{AE}\right) dl = m \frac{d^2\psi(l)}{dt^2} \quad (24)$$

For et uendelig lite element vil  $\cos(d\theta) = 1$ ,  $\sin(d\theta) = d\theta$  og  $dT d\theta = 0$ . Dette gir videre at ligningene i den aksielle og normale retningen kan skrives som

$$dT - P \sin(\theta)dl + F_\phi \left(1 + \frac{T}{AE}\right) dl = m \frac{d^2\phi(l)}{dt^2} \quad (25)$$

$$T d\theta - P \cos(\theta)dl - F_\psi \left(1 + \frac{T}{AE}\right) dl = m \frac{d^2\psi(l)}{dt^2} \quad (26)$$

I ligning (25) og (26) kan de hydrodynamiske kreftene  $F_\phi$  og  $F_\psi$  regnes ut med forskjellige metoder. I denne oppgaven blir Morison-teorien brukt til å regne ut  $F_\phi$  og  $F_\psi$  [27]. Ligningene over er basert på at kraften er i dynamisk balanse. Ser man på forholdet mellom  $l$  og  $\theta$  og posisjonen i  $x - z$  koordinatsystemet i Figur 14 får man at

$$dx = \left(1 + \frac{T}{AE}\right) \cos(\theta)dl \quad , \quad (27)$$

$$dz = \left(1 + \frac{T}{AE}\right) \sin(\theta) dl \quad . \quad (28)$$

$d\phi$  og  $d\psi$  i forhold til  $x - z$  kan beskrives ved

$$d\phi = dx \cos(\theta) + dz \sin(\theta) \quad (29)$$

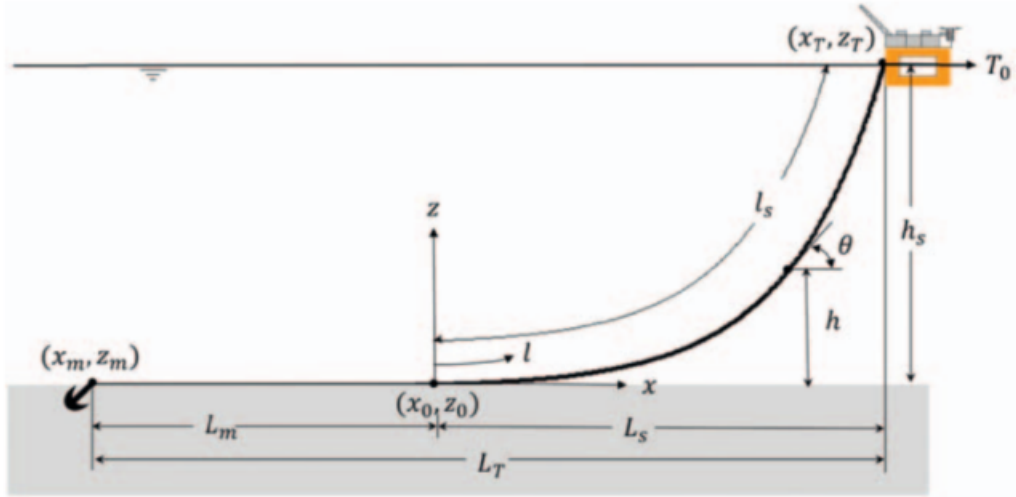
$$d\psi = dz \cos(\theta) - dx \sin(\theta) \quad (30)$$

Kombinerer man ligning (25) til (30), sammen med grenseverdier for innfestningspunktene på sjøbunnen og på konstruksjonen, får man differensialligninger som beskriver forankringslinene med hensyn til både elastisiteten og dynamikken til linene. Disse ligningene er ikke-lineære, noe som vil si at de ikke har noen generelle analytiske løsninger [23]. I denne oppgaven blir det derfor brukt numeriske analyseverktøy som baserer seg på FEM (finite element method) til å beregne lastene.

### 2.5.3 Kjedelineformlene - statisk tilnærming

Systemkarakteristikken til et fortøyningsarrangement viser hvordan forskyvningen til konstruksjonen endrer seg ved en påkjenning av en ytre last i horisontal retning. Forskyvningen avhenger av hvilken retning kraften virker på, og det er derfor viktig å ta hensyn til flere retninger når man skal bestemme systemkarakteristikken. Systemkarakteristikken avhenger av linekarakteristikken og forankringslinenes forspenning. Forspenningene til linene er påsatt strekk i forankringslinene når konstruksjonen er i statisk likevekt [25].

Forankringssystemets linekarakteristikk viser forholdet mellom forskyvningen av fortøyningslinens innfestningspunkt og den horisontale kraften som virker på konstruksjonen. For å finne linekarakteristikken kan kjedelinjeformlene brukes [23]. Figur 15 er en skisse på geometrien til en slakklineforankring med tilhørende parametre [23].



Figur 15: Statisk tilnærming, definisjonsskisse [23]

Ser man bort fra de dynamiske lastene som virker på konstruksjonen, men betrakter miljølastene som en horisontal, konstant kraft,  $T_0$ , kan man utlede formler for linens totale lengde,  $L_T$  og konstruksjonens forskyvning i forhold til sjøbunnen. Aksialstivheten blir antatt å være uendelig, da kan man se på linene som uelastiske. Den horisontale kraftkomponenten ved innfestningspunktet på konstruksjonen er gitt ved

$$T_H = P \left( \frac{l_s^2 - h_s^2}{2h_s} \right) \quad , \quad (31)$$

hvor  $l_s$  er fritthengende linelengde. Setter man horisontal last lik bruddlast ( $T_H = T_B$ ) og løser Formel (31) for  $l_s$ , vil man kunne finne total linelengde, gitt ved

$$l_T = l_s = \sqrt{h_s \left( h_s + \frac{2T_B}{P} \right)} \quad . \quad (32)$$

Horisontalavstanden mellom linens nedslagspunkt på sjøbunnen og innfestningspunkt på konstruksjonen er gitt ved

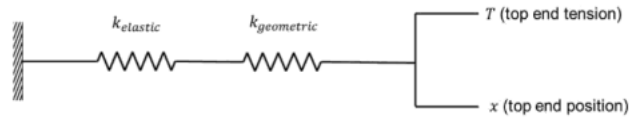
$$L_s = \frac{T_0}{P} \ln \left( \frac{T}{T_0} + \sqrt{\left( \frac{T}{T_0} \right)^2 - 1} \right) \quad , \quad (33)$$

hvor  $T$  er den totale strekkraften i linen ved toppunktet og er gitt ved

$$T = T_0 + Ph_s \quad . \quad (34)$$

## 2.5.4 Stivhet

For å forstå linestivheten kan man se på forholdet mellom forskyvningen til innfestningspunktet og linespenningen som et enkelt fjærsystem. Linestivheten gir et forhold mellom kraften og forskyvningen, vist ved Figur 16. Linestivheten er sammensatt av et geometrisk og elastisk bidrag. Hvor det geometriske bidraget i hovedsak baserer seg på strukturens geometriske utforming, og deformasjonen uavhengig av materialegenskapene. Den elastiske stivheten derimot avhenger av materialparametrene og beskriver materialets evne til å motstå deformasjon når utsatt for en kraft [23].



Figur 16: Linestivhet [23]

Den totale linestivheten i en enkelt forankringsline kan uttrykkes ved

$$\frac{1}{k_{\text{total}}} = \frac{1}{k_{\text{elastisk}}} + \frac{1}{k_{\text{geometrisk}}} \quad , \quad (35)$$

hvor  $k_{\text{elastisk}}$  kan defineres som  $\frac{A_{tv}E}{L}$ .  $A_{tv}$  er tverrsnittsarealet til linen,  $E$  er elastisitetsmodulen og  $L$  er lengden til linen. For å utlede et uttrykk for den den geometriske stivheten i jaggretning kan man ta utgangspunkt i en line som ikke har noen elastisitet. Dersom man videre antar at konstruksjonen oscillerer med små bevegelser rundt likevektsposisjonen, med  $\eta_1$  som bevegelsen i x-retning, får man at den horisontale spenningen kan skrives som

$$T_H = (T_H)_M + k_{11}\eta_1 \quad . \quad (36)$$

Her er  $k_{11}$  stivheten i x-retning. For å kunne få et uttrykk for stivheten kan man se på forholdet mellom en liten forandring i spenningen,  $dT_H$ , som vil resultere i en liten endring i forskyvning,  $d\eta_1$ . Fra Figur 15 har man at  $L_T = l - l_s + x$ , dette gir videre uttrykket

$$L_T = l - \sqrt{h \left( h + 2 \frac{T_H}{P} \right)} + \frac{T_H}{P} \cosh^{-1} \left( \frac{Ph}{T_H} + 1 \right) \quad . \quad (37)$$

Setter man inn Formel (36) i Formel (37) og løser for  $k_{11}$  får man følgende uttrykk for den geometriske stivheten i jagg

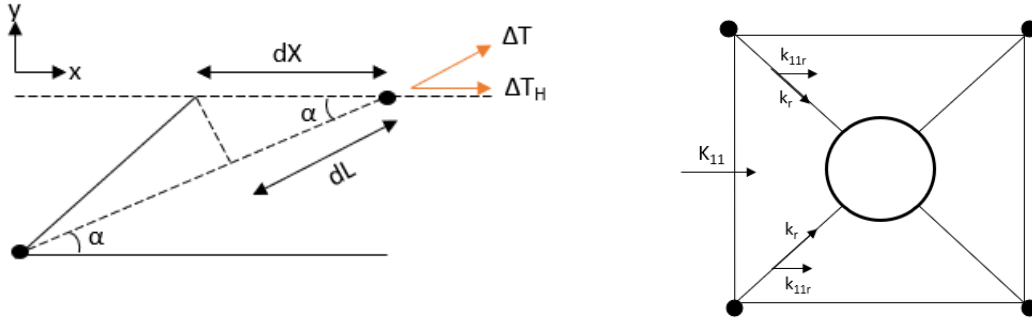


$$k_{11} = \frac{P}{\left( \cosh^{-1} \left( \frac{Ph}{T_H} + 1 \right) - \left( 2/\sqrt{1 + \left( 2\frac{T_H}{Ph} \right)} \right) \right)} \quad (38)$$

For å finne den vertikale komponenten til linens geometriske stivhet bruker man samme metode, men ser på en liten endring i den vertikale spenningen,  $T_v$  og  $h$ . Den vertikale stivheten,  $k_{33}$  kan uttrykkes ved

$$k_{33} = \frac{Ph + T_0}{\sqrt{h^2 + (2(t_0/P)h)}} \quad (39)$$

For et forankringssystem med flere forankringslinjer må stivhetene i hver line dekomponeres for å finne den resulterende stivheten på systemet. I denne oppgaven består forankringslinene i hovedsak av tau, som er dominert av elastisk stivhet. Derfor antas det at man kan neglisjere det geometriske bidraget til stivheten. Figur 17a viser forholdet mellom konstruksjonens forskyvning og den elastiske forlengelsen av en enkelt line. Ut i fra denne figuren kan man utlede et uttrykk for stivheten i x-retning [28].



(a) Forhold mellom horisontal forskyvning og linestrek [28]

(b) Rammeformetøyning

Figur 17: Stivhet i rammen til rammeformetøyningen

$$dL = \cos \alpha dX$$

$$\Delta T = \frac{EA_{tv}}{L} \cdot dL$$

$$\Delta T_H = \frac{EA_{tv}}{L} \cos^2 \alpha \cdot dX$$

$$k_{11r} = \frac{\Delta T_H}{dX} = \frac{EA_{tw}}{L} \cos^2 \alpha \quad (40)$$

Siden Egget<sup>®</sup> er forankret med to parallelle liner, vist ved Figur 17b, blir den resulterende stivheten for systemet

$$K_{11r} = 2k_{11r} = 2 \frac{EA_{tw}}{L} \cos^2 \alpha \quad . \quad (41)$$

## 2.6 Skalering

I denne oppgaven brukes Froude's skaleringslover til å oppskalere de eksperimentelle resultatene til full skala. Froude skalering baserer seg på det dimensjonsløse kraftforholdet mellom treghet og gravitasjon, hvor Froude-nummeret er gitt ved  $F_n = \frac{U}{\sqrt{gL}}$  der  $U$  er hastighet og  $L$  er den karakteristiske lengden [29]. Dette gir opphavet til skaleringslovene gitt i Tabell 1. Ved å benytte disse skaleringslovene sørger man for geometrisk likhet mellom modellskala eksperiment og fullskala simuleringer [23].

Tabell 1: Froude skalering [23]

Type	Enhet	Skaleringsfaktor
Lengde	m	$\lambda$
Masse	kg	$\lambda^3$
Periode	s	$\sqrt{\lambda}$
Frekvens	$\frac{1}{s}$	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}}$
Kraft	N	$\lambda^3$

## 2.7 Regelverk og standarder

Det finnes flere relevante standarder man må forholde seg til ved dimensjonering av fortløysningssystemet til et lukket oppdrettsanlegg. Og man må forholde seg til forskriften om krav til teknisk standard for flytende akvakulturanlegg, NYTEK-forskriften. Denne har som hensikt å forhindre rømming av fisk på grunn av teknisk svikt, og viser til standarden for flytende oppdrettsanlegg NS9415 [30].

### 2.7.1 Norsk standard for flytende oppdrettsanlegg, NS9415

Norsk standard for akvakultur stiller krav til lokalitetsundersøkelse, prosjektering, utførelse og bruk av akvakulturanlegg. Standarden har som formål å forhindre rømming av fisk fra

oppdrettsanlegg ved å forebygge teknisk svikt og sørge for samspill mellom alle komponentene [31]. Hovedpunktene som er viktige for denne oppgaven inkluderer miljølast, krav til stabilitet, krav til innhegning og krav til fortøyning inkludert.

Akvakulturenhetene skal dimensjoneres for å kunne motstå de ytre lastene som påføres konstruksjonen fra de fysiske miljøforholdene vind, bølger, strøm og vannstandsvariasjon, samt is, snø og begroing der det er aktuelt. I følge NS9415 skal disse miljøforholdene fastsettes gjennom lokalitetsundersøkelser og målinger. I denne oppgaven er det som nevnt kun tatt hensyn til bølger, hvor det er valgt ut tre forskjellige sjøtilstander.

Standarden stiller krav til flyterens og innhegningens stabilitet, hvor det skilles mellom intakt og skadet stabilitet. I denne oppgaven tas det kun utgangspunkt i intakt situasjon og det blir etablert hydrostatisk beregninger på bakgrunn av dette. Kravene fra standarden er at flyteren skal ha nødvendig og dokumentert stabilitet for å forhindre rømming av fisk. Siden Egget<sup>®</sup> ikke er en vanlig flyter er det vanskelig å tolke hva kravene til stabilitet er. Derfor blir det i denne oppgaven tatt utgangspunkt i stabilitetskrav til en fôrflåte gitt i NS9415:

- Arealet under GZ-kurven fra 0 grader til største rettende arm skal ikke være mindre enn 0.08m-rad
- Statisk krenning forårsaket av en jevnt fordelt last tilsvarende vindhastighet 30 m/s skal ikke tilsvare en krengevinkel tilsvarende halve fribordet.
- GZ skal minst være positiv til 15 grader.

Som nevnt innledningsvis er forankringsarrangementets oppgave å holde oppdrettsanlegg i posisjon til enhver tid. For å forhindre rømming av laks er det derfor viktig at samspillet mellom forankringssystemet og resten av oppdrettsanlegget er utformet slik at rømming ikke kan oppstå. Ser man på tradisjonelle oppdrettsmerder er gnag mellom notlin og fortøyningsliner en av de største faktorene som kan føre til slitasje og hull i notposen. Ved å ha en lukket innhegning hvor fisken oppholder seg vil ikke dette problemet oppstå. Ved å ha en konstruksjon som ikke tillater gjennomstrømning vil de dimensjonerende miljøkreftene opptre på en annen måte enn for en tradisjonell merd hvor vannet kan strømme gjennom notveggen. På generelt grunnlag skal forankringssystemet dimensjoneres til å holde oppdrettsanlegget tilstrekkelig posisjonert med hensyn til samvirke med resten av anlegget. Ved prosjektering av forankringssystemet skal bunntopografi, miljøforhold, bunnforhold og lastgivende komponenter dokumenteres og tas hensyn til. Ved en lukket innhegning som Egget<sup>®</sup> er viktig å vurdere variasjonen i den frie overflaten til det indre vannvolumet. Høydeforskjellen i indre og ytre

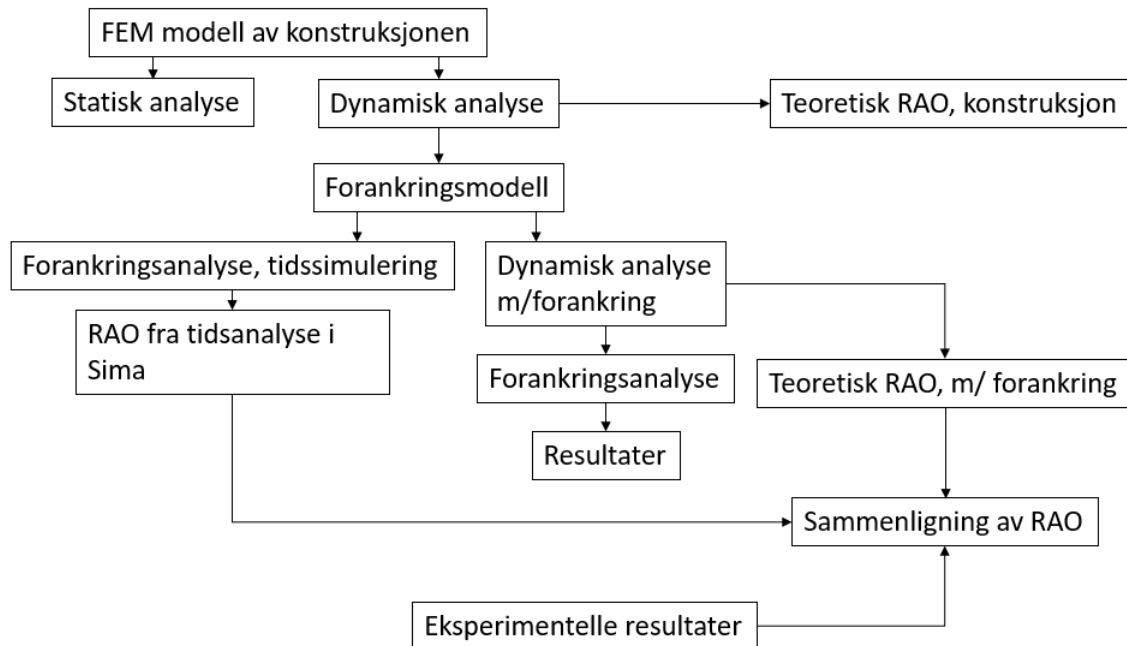
vannmasse når det blir etablert en indre vannstrøm, trykkforskjeller og overskylling er også viktig å ta i betraktning ved beregning av lastene som oppstår [31].

NS9415 stiller krav til at det gjennomføres en globalanalyse av hele akvakulturkonstruksjonen. Denne analysen kan deles inn i to, hvor man skiller mellom konstruksjonens bevegelse, herunder respons, forskyvning, hastigheter og akselerasjoner, og krefter i konstruksjonens hovedkomponenter og ekstrautstyr. I denne oppgaven er det i hovedsak fokus på konstruksjonens bevegelse, hvor det tas utgangspunkt i kun en lukket enhet. Akvakulturanlegget skal dimensjoneres for å kunne motstå alle laster som kan opptre i anleggets brukstid. Disse lastene står listet opp under.

- Permanente laster
- Variable funksjonslaster
- Deformasjonslaster
- Miljølaster
- Ulykkeslaster

### 3 Numerisk metode

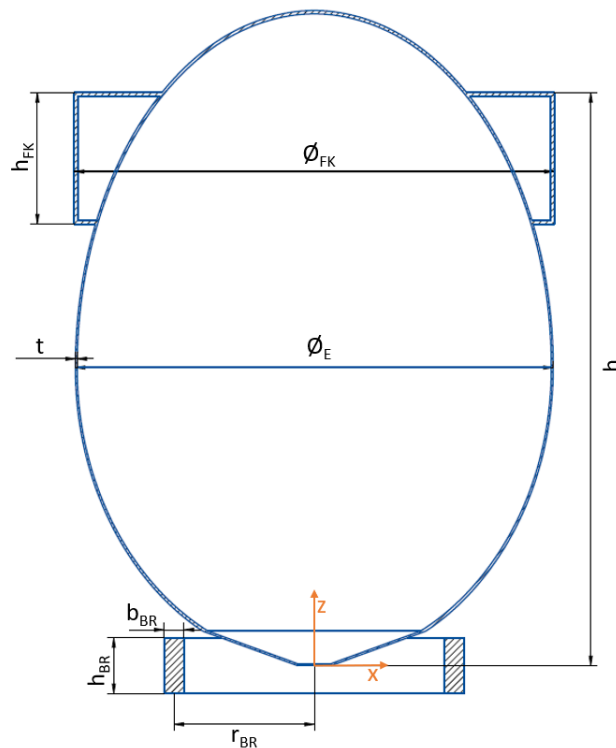
I denne oppgaven blir det gjennomført en koblet analyse, med utgangspunkt i DNV's 'Recommended Practice DNV-RP-F205' [32]. Koblet analyse vil si at den endelige modellen er en sammensatt konstruksjon hvor det tas hensyn til både flyterens bevegelse og responsen til forankringssystemet. Figur 18 viser hvordan hele prosessen er satt opp, hvor flyteren blir modellert som en "Finite element (FE)" modell, før det blir gjennomført en hydrostatisk og -dynamisk analyse av flyteren. Resultatene fra de hydrostatiske- og dynamiske analysene blir presentert i metoddelen, da disse danner grunnlaget for forankringsanalysen. Videre blir forankringsmodellen modellert som et "slender system", slankt system. Selve forankringsanalysen blir kjørt med to forskjellige metoder. Én i frekvensplanet hvor man får en teoretisk RAO med forankring, og en simulering i tidsplanet hvor man kan beregne RAO ut i fra bølgehevningen og responsen som funksjon av tid. Resultatene fra analysene blir så sammenlignet og validert opp mot eksperimentelle resultater fra forsøk som er gjennomført i MarinLab ved Høgskulen på Vestlandet [11].



Figur 18: Numerisk metode, koblet forankringsanalyse

### 3.1 Egget's dimensjoner

Konstruksjonen som er benyttet i denne oppgaven er en oppskalert modell av et modellskala "Egg" som ble laget i forbindelse med en bacheloroppgave [33]. Hensikten med dette er å sikre geometrisk likhet mellom skalert og fullskala modell. Da kan resultatene valideres mot hverandre. Konstruksjonen består av 3 hovedkomponenter, selve skroget som er formet som en ellipse, flyteringen på toppen og en bunnring i bunnen. Dimensjonene er hentet fra modellen og oppskalert til fullskala konstruksjon med en skaleringsfaktor  $\lambda = 21.25$ . En oversikt over Egget<sup>®</sup> sine dimensjoner er vist i Figur 19. I Tabell 2 står fullskala og modellskala dimensjoner oppført.



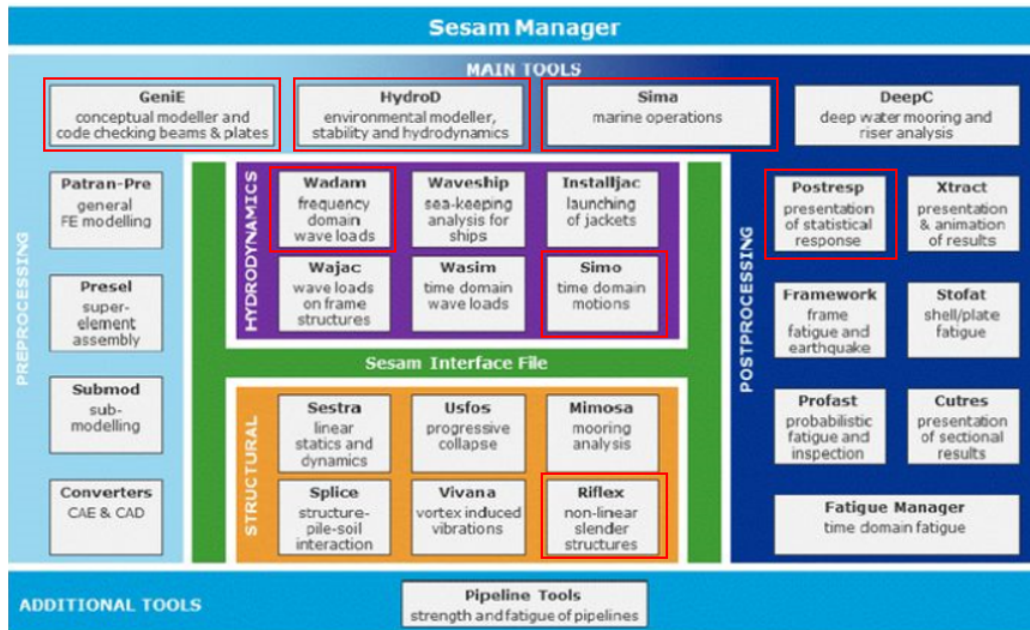
Figur 19: Geometrien til Egget<sup>®</sup>

Tabell 2: Geometriske verdier til Egget.

Parameter	Notasjon	Modellskala	Fullskala	Enhet
Høyde	$h$	845.5	17966.9	mm
Høyde flytekrage	$h_{FK}$	195	4144	mm
Høyde bunnring	$h_{BR}$	82	1742.5	mm
Bredde bunnring	$b_{BR}$	29.5	626.9	mm
Diameter ekvator	$\varnothing_E$	353	7501	mm
Diameter flytekrage	$\varnothing_{FK}$	356.5	7575.6	mm
Radius bunnring	$r_{BR}$	206.25	4382.8	mm
Tykkelse	$t$	3	N/A	m
Vannlinjeareal	$A_{vl}$	0.4	176.7	m <sup>2</sup>
Masse	$m$	34.4	$3.3 \cdot 10^5$	kg
Trehetsradius, x og y (Tørr vekt)	$R_{xx}, R_{yy}$		11.9	m
Trehetsradius, z (Tørr vekt)	$R_{zz}$		3.3	m
Vektdeplasement	$\Delta$	251.8	2487269.1	kg
Volumdeplasement	$\nabla$	0.25	2456.65	m <sup>3</sup>
Arealtrehetsmoment indre vannvolum	$I_T$	0.003	660.1	m <sup>4</sup>

### 3.2 Numerisk programvare

De numeriske analysene er gjennomført i programvaren SESAM som er utviklet av Det Norske Veritas (DNV). Postprosessering av resultatene er gjort både i SESAM og i MATLAB. Sesam er utviklet for å kunne utføre styrkeberegninger, hydrostatiske og -dynamiske analyser på konstruksjoner til havs. Programvaren er delt inn i flere underprogrammer, som alle bygger på hverandre. En oversikt over disse programmene er vist i Figur 20, hvor de som er brukt i denne oppgaven er markert i rød firkant. GeniE er brukt til å modellere konstruksjonen, HydroD er brukt til hydrostatisk analyse og Wadam brukes til den hydrodynamisk analyse. Forankringsanalysen er gjennomført i Sima, som er utviklet av SINTEF i samarbeid med DNV. I Sima blir Simo og Riflex brukt til å sette sammen den koblede analysen. Tabell 3 viser programversjon.



Figur 20: Oversikt SESAM [34]

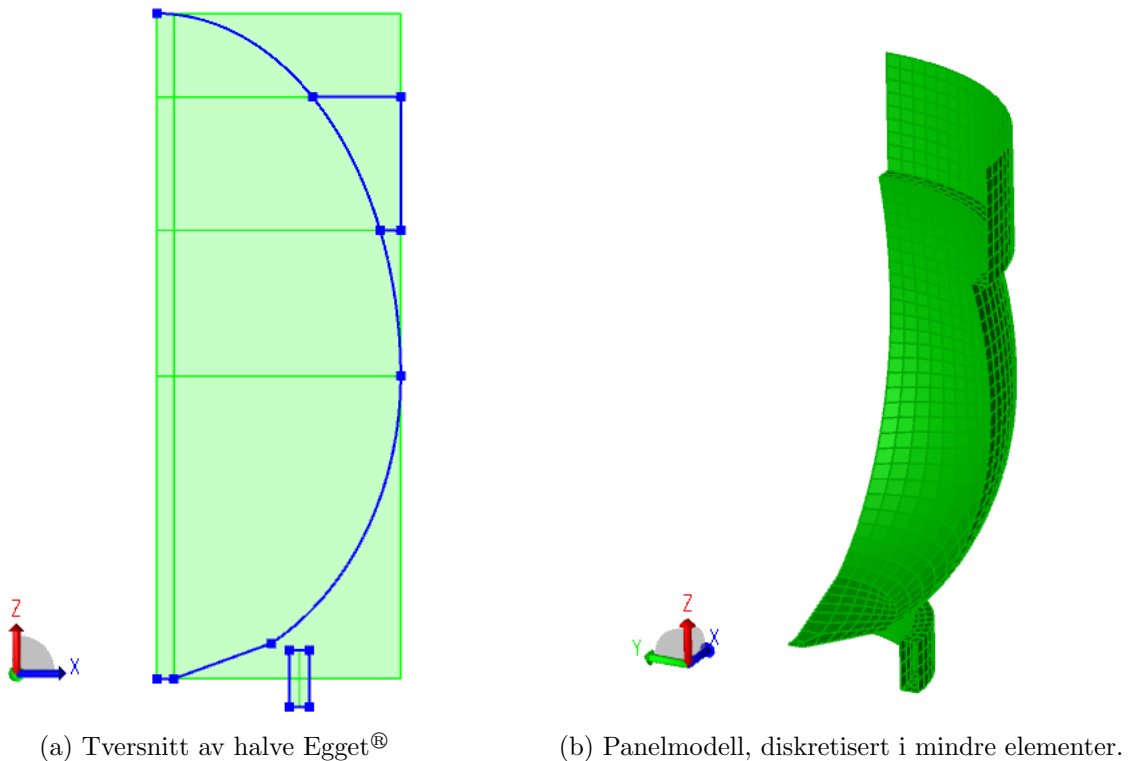


Tabell 3: Oversikt programvare

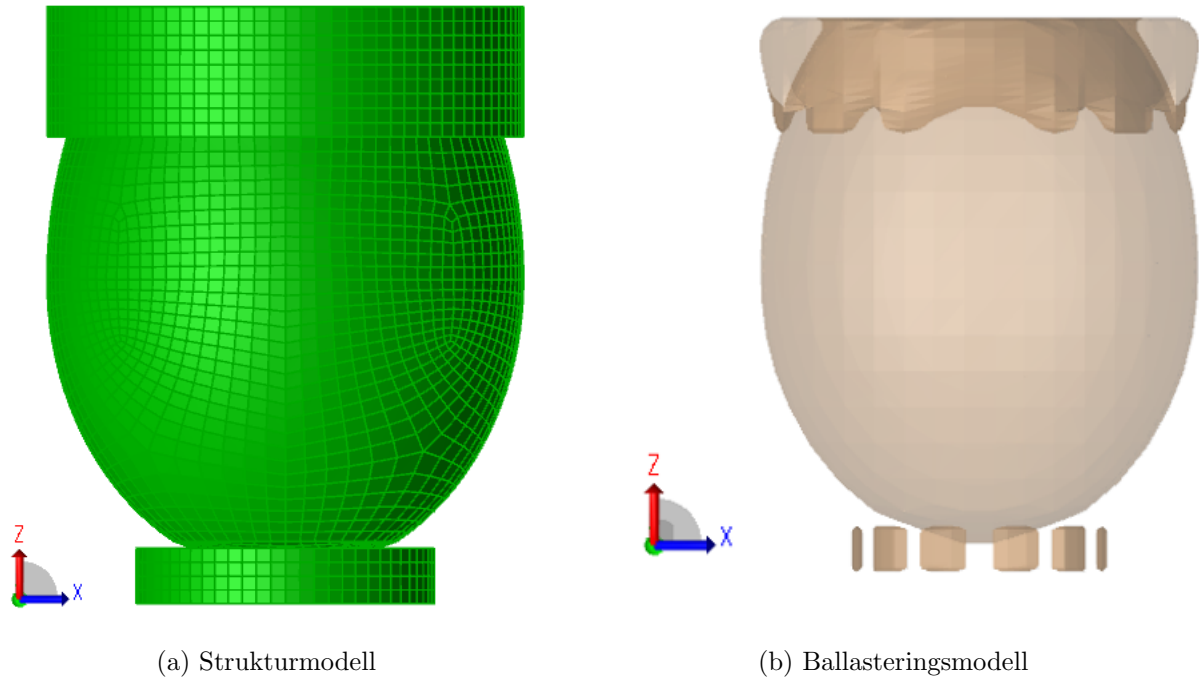
Programvare	Versjon
Sesam Manager	V6.5-01
GeniE	8.2.4 (64)
HydroD	6.0.0 (64)
Wadam	9.3.7 (64)
Postresp	6.6.2 (32)
Sima	4.2.0 (64)
Simo	4.16.2 (64)
Riflex	4.16.2 (64)
MATLAB	R2018b 9.5.0.944444 (64)

### 3.3 Modelling i GeniE

Egget<sup>®</sup> er modellert i SESAM's modelleringsprogram, GeniE. Her er konstruksjonen modellert ved å rotere konstruksjonens tverrsnitt 360° rundt sin egen akse, i henhold til dimensjonene fra Tabell 19. Konstruksjonens tverrsnitt er vist ved Figur 21a. For å kunne gjennomføre analysene i HydroD trengs det en panelmodell, strukturmodell, ballasteringsmodell og Morison modell. Panelmodellen er definert som 1/4 konstruksjon hvor lastbetingelser for hydrostatisk trykk er definert på den nedsenkede delen av konstruksjonen. Det er denne modellen som benyttes når de hydrodynamiske lastene på storvolumkonstruksjonen beregnes i Wadam. Strukturmodellen modellert med ballasttanker, vist ved Figur 22b. Grafikken i GeniE er ikke så bra, så bunnringen vises med flere ballasttanker, selv om det bare er én. Materiale og platetykkelse er ikke tatt hensyn til da konstruksjonens masse først blir definert i HydroD. Bunnringen er også modellert som Morison modell ved å bruke todimensjonale bjelke-element. Hensikten med Morison-modellen er å kunne ta hensyn til viskøse bidrag rundt bunnringen.



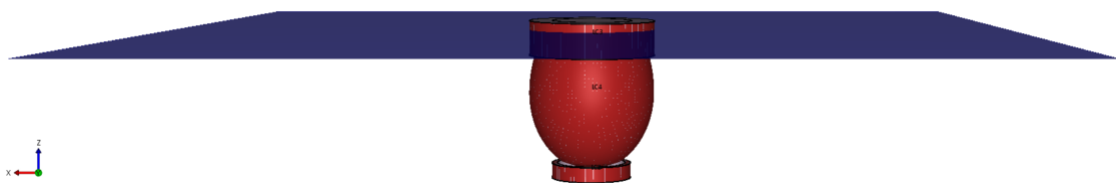
Figur 21: Modelling av Egget<sup>®</sup> i GeniE



Figur 22: Strukturmodell og ballasteringsmodell

### 3.4 Hydrostatikk

Den hydrostatiske analysen er gjennomført i HydroD, hvor målet er å dokumentere de hydrostatiske egenskapene og stabiliteten til Egget<sup>®</sup>. Panelmodellen, hele konstruksjonen og Morison-modellen er importert. Siden konstruksjonen er modellert uten materialegenskaper og tykkelse er en egen massemodell definert i HydroD. Der er konstruksjonens masse sentrert i gravitasjonsenteret og ballasteringsvekter er plassert geometrisk likt som for modellskala eksperiment [11], dette gir et fribord på 1m. Figur 23 viser Egget<sup>®</sup> ballastert i HydroD.

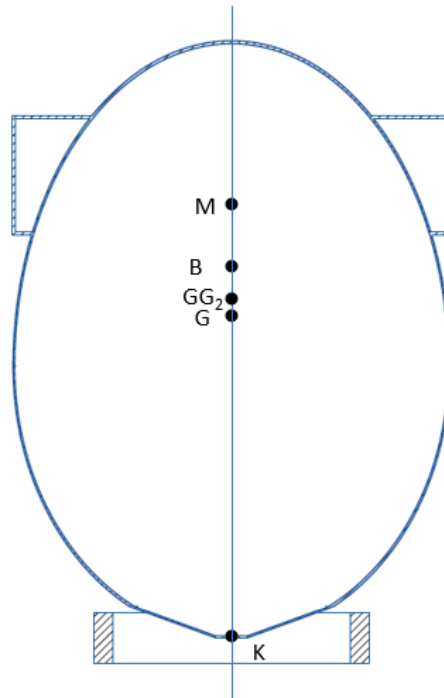


Figur 23: Egget<sup>®</sup> i HydroD

Den hydrostatiske tabellen er hentet ut ved dyppgang fra 1m til 17m. En fullstendig hydrostatisk tabell ligger vedlagt som Vedlegg A. Nøkkelinformasjonen fra de hydrostatiske beregningene er presentert i Tabell 4 og vist i Figur 24. Her er også verdiene fra eksperimentelt forsøk inkludert og skalet til full skala [11].

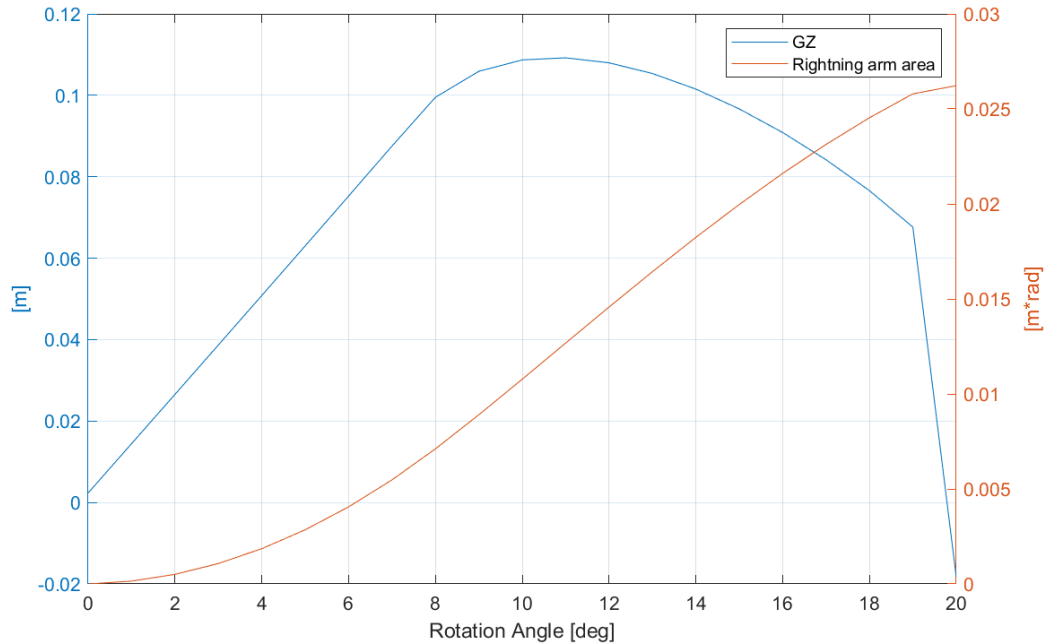
Tabell 4: Hydrostatiske verdier

Parameter	Oppskalert fra modell [11]	Fullskala	Enhet
KG	9.44	9.37	m
KB	10.41	9.68	m
KM	10.69	10.70	m
GG <sub>2</sub>	0.255	0.27	m
GM	1.00	1.06	m



Figur 24: Hydrostatiske verdier

Stabiliteten til Egget<sup>®</sup> undersøkes ved intakt tilstand. Analysen er satt opp med krengevinkel,  $\phi$ , fra  $0^\circ$  til  $20^\circ$  og en last tilsvarende vindhastighet på 30m/s. Resultatene er hentet ut og postprossesert i MATLAB. Resultatet fra stabilitetsanalysen er vist ved Figur 25. Grafen viser at Egget's stabilitet er godkjent i henhold til NS9415.



Figur 25: Stabilitet

### 3.5 Hydrodynamisk analyse

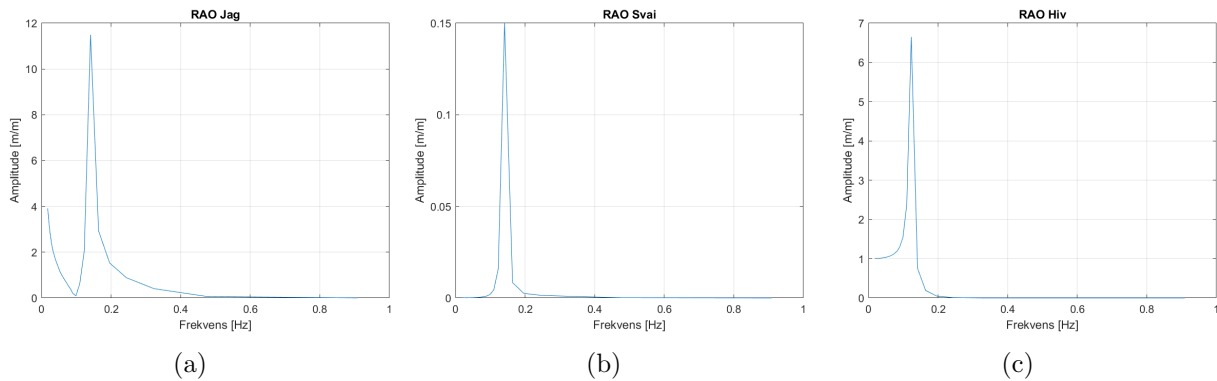
Den hydrodynamiske analysen er gjennomført i Wadam i HydroD. Wadam er et av underprogrammene i SESAM-pakken og brukes til å beregne interaksjonen mellom bølger og konstruksjon i frekvensplanet [34]. Analysen er satt opp ved å importere modellene fra GeniE og definere tilhørende grenseverdier. Videre er massemodell definert før konstruksjonen er ballastert til operasjonsdypgang. I frekvensplan-analyse blir 3D potensialteori og Morison's teori brukt til å beregne bevegelsen og lastene til konstruksjonen ved hver av de regulære bølgene definert med forskjellig periode i analysen, vist i Tabell 5. Dette gir RAO, krefter/moment, tilleggsmasse og dempning som resultater [20].

Tabell 5: Frekvensintervall hydrodynamisk analyse

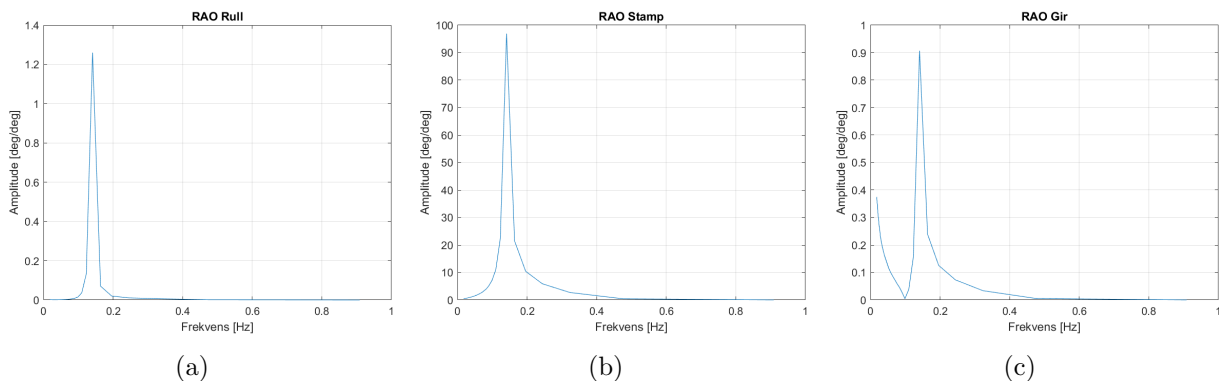
	Fra	Til	Steglengde
Periode	0.1 s	20.1 s	1 s
	20.1 s	30.1 s	5 s
	30.1 s	55.1 s	1s

Fra analysen henter man ut transferfunksjonene til konstruksjonens respons i de seks frihetsgradene, samt tilleggsmasse og dempning i underprogrammet Postresp. Transferfunksjonene

i translasjonene er gitt ved Figur 26 og rotasjonene er gitt ved Figur 27. Disse RAOene blir brukt som input i Sima når forankringsanalysen gjennomføres. Det er verdt å merke seg at konstruksjonen ikke er forankret i noen av frihetsgradene i denne analysen. Fra RAOene ser man at man har en distinkt topp ved 0.14Hz, med unntak av hiv hvor toppen er ved 0.12Hz. Dette kan forklares med symmetrien til Egget<sup>®</sup>.

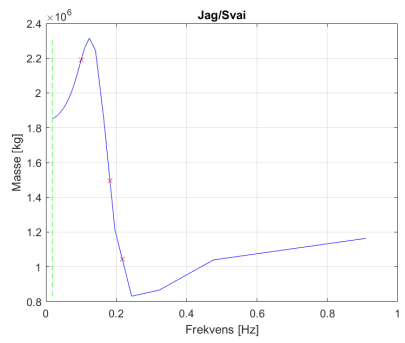


Figur 26: RAO i frihetsgradene jag, svai og hiv uten forankring

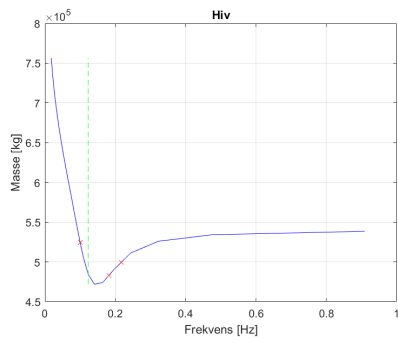


Figur 27: RAO i frihetsgradene rull, stamp og gir uten forankring

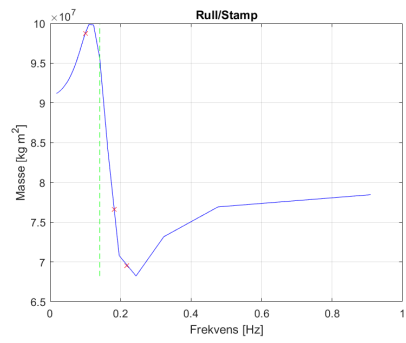
Tilleggsmassen og konstruksjonens totale demping endres som funksjon av frekvensen. Figur 28 viser konstruksjonens tilleggsmasse, hvor toppunktet indikerer ved hvilken frekvens man har den største tilleggsmassen. For jag, svai, rull og stamp er dette toppunktet ved ca. 0.12 Hz. For hiv går tilleggsmassen mot uendelig ved lavere frekvens, og har ett bunnpunkt ved 0.12 Hz. Topp-frekvensen til sjøtilstandene som blir introdusert senere i oppgaven er markert ved rød "x". Figur 29 viser den totale dempingen som funksjon av bølgefrekvens. Her ser man ved hvilken bølgefrekvens man har størst demping. Den totale dempingen er med å påvirke hvor mye energi som spres av strukturen som respons på belastning fra bølgene, og hvordan bevegelsen til strukturen påvirkes av samspillet mellom bølgene og strukturen.



(a)

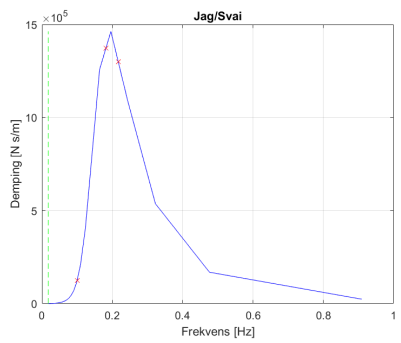


(b)

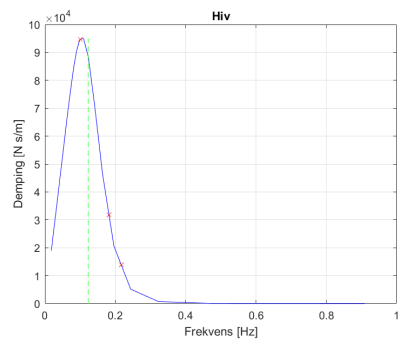


(c)

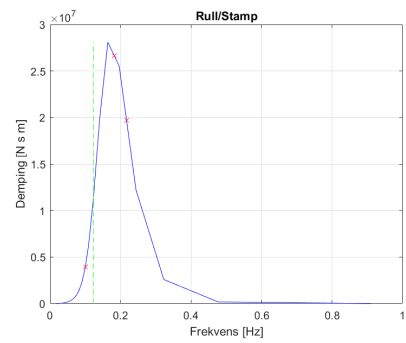
Figur 28: Tilleggsmasse



(a)



(b)



(c)

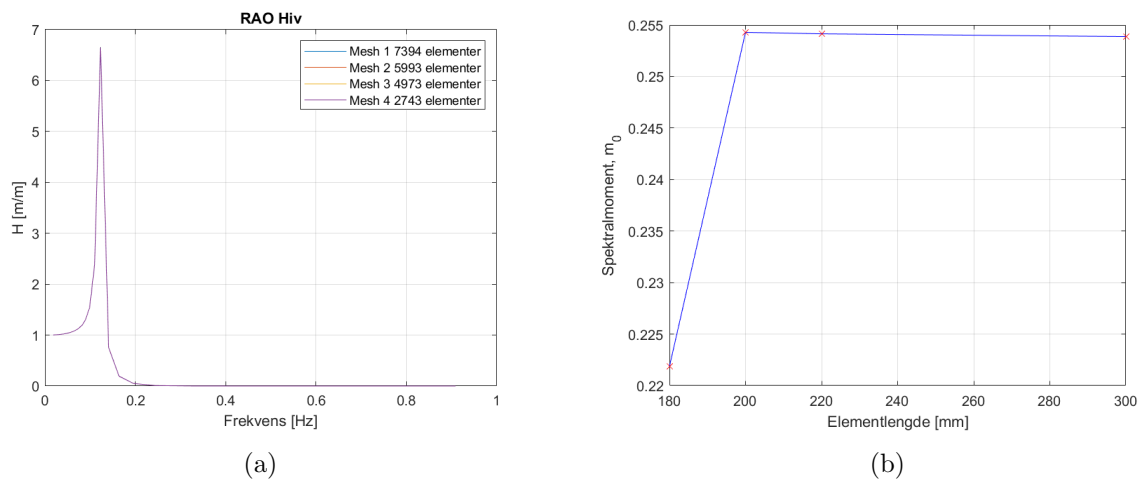
Figur 29: Total dempning

### 3.5.1 Mesh-studie

Valg av elementstørrelse er en viktig del av bakgrunnsarbeidet før analysene kan gjennomføres. Det er viktig å få tilstrekkelig antall elementer slik at geometrien blir representert best mulig i analysene, samtidig som beregningene er gjennomførbare og effektive med tanke på tidsbruk og datakraft. I HydroD er det panel-modellen som danner grunnlaget for beregningene av de hydrodynamiske lastene og konstruksjonens bevegelser. Derfor er det gjennomført en konvergenstudie av ulike elementstørrelser, hvor det er kjørt fire hydrodynamiske analyser for å sammenligne RAOene. Tabell 6 viser de ulike elementlengdene som er brukt, og antall noder og elementer. Figur 46 ser man i Figur (a) RAOen for hiv ved de 4 elementstørrelsene. man ser at de er tilnærmet like, men ved M1 ble datamengden for stor til at maskinen klarte å kjøre ved lave frekvenser. Dette ser man igjen med Figur (b). I Figur (b) ser man også at analysen konvergerer, og arealet under RAOen for hiv er tilnærmet konstant for elementlengdene M2-M4. Det er derfor valgt elementstørrelse M2, med elementlengde på 200mm.

Tabell 6: Mesh studie

Mesh case	Elementlengde [mm]	Antall noder	Antall elementer
M1	180	7579	7394
M2	200	6163	5993
M3	220	5128	4973
M4	300	2856	2743



Figur 30: Meshstudie



## 3.6 Forankringsanalyse

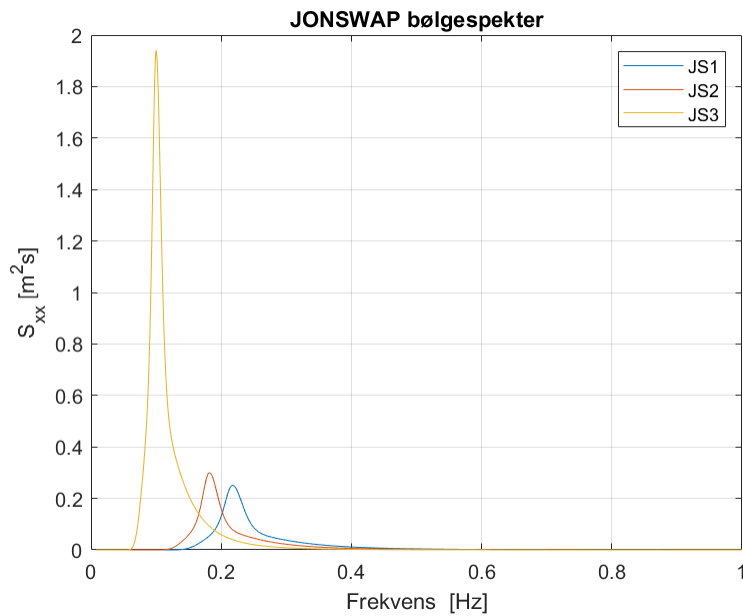
Som nevnt innledningsvis i kapitlet er forankringsanalysen gjennomført som en koblet analyse. Her er programvaren Reflex og Simo i Sima brukt til å kjøre analysene, hvor resultatene fra den hydrodynamiske analysen blir brukt som inngangsdata. Sima baserer seg på FE-metoden, hvor linene diskretiseres i små elementer for å estimere de ikke-lineære forholdene i forankringslinene. Selve analysen tar utgangspunkt i å løse bevegelsesligningen for til konstruksjonen hvor dempning, tilleggsmasse og bidrag fra forankringslinene blir tatt hensyn til [27]. Fra tidssimuleringen i denne oppgaven får man ut responsen til konstruksjonen som funksjon av tid, samt linespenninger og bølgeheving. For hver av de forskjellige testoppsettene i denne oppgaven blir det RAOene beregnet ut i fra tidssimuleringen. For det forenklete testoppsettet blir det også tatt ut en teoretisk RAO ved å gjennomføre en ny hydrodynamisk analyse Wadam, men denne gangen med å definere samme stivheter som i tidssimuleringen. Testoppsettet for de tre forskjellige forankringene blir nærmere gjennomgått i dette kapitlet.

### 3.6.1 Sjøtilstand

Forankringsanalysen er gjennomført ved 3 forskjellige sjøtilstander, vist i Tabell 7. JS1 og JS2 er valgt for å kunne sammenligne og validere de numeriske beregningene mot eksperimentelle resultater [11]. JS3 har en topp-periode som er nærmere Egget's egenfrekvens i hiv, det forventes derfor at man vil få et større utslag i systemets respons ved denne sjøtilstanden. Figur 31 viser hver av de tre teoretiske bølgespektrumene.

Tabell 7: Sjøtilstander

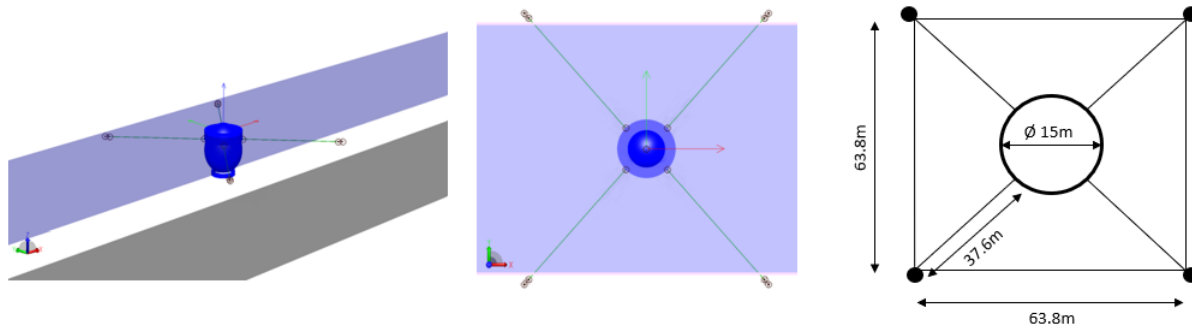
Sjøtilstand	$H_s$ [m]	$T_p$ [s]	$\omega_p$ [Hz]
JS1	0.53	4.6	0.217
JS2	0.53	5.5	0.182
JS3	1	10	0.1



Figur 31: Sjøtilstand

### 3.6.2 Forenklet rammefortøyning

Forankringsmodellen til den forenklede rammefortøyningen er satt opp ved å kun modellere de fire forankringslinene i hvert hjørne av rammefortøyningen, hvor endene er låst med faste noder. Hensikten med dette er å kunne representere det eksperimentelle forsøket, og sørge for geometrisk likhet ved skalering av de to oppsettene. I de eksperimentelle forsøkene er forankringsliniene festet til tankveggen, ikke i bunnen [11]. Analysen er gjennomført som beskrevet som vist i Figur 18 ved de tre sjøtilstandene beskrevet i Kapittel 3.6.1. Figur 32 viser testoppsettet i Sima. For å kunne gjennomføre den koblede analysen i Sima, hvor man opererer med en modell for selve konstruksjonen (importert fra Wadam) og en forankringsmodell, kobler man de to modellene sammen med en "dummy" node. Denne noden blir plassert i senter til konstruksjonens lokale koordinatsystem, og kobler konstruksjonen til det globale koordinatsystem til forankringsmodellen når analysen kjøres.



Figur 32: Oppsett til forenklet rammefortøyning i Sima

Forankringslinenes dimensjoner er satt opp med parameterene vist i Tabell 8. Her er det tatt utgangspunkt i 56mm 3-slått Supertec tau, men stivheten er endret for å oppnå geometrisk likhet med eksperimentelt testoppsett [11].

Tabell 8: Parametre til forankringslinene

Parameter	Størrelse
Diameter [mm]	56
Lengde [m]	37.6
Antall elementer	74
Masse koeffisient [kg/m]	1.42
Stivhet [kN/m]	32.6

Det er også gjort en undersøkelse på hvordan stivheten påvirker systemets egenfrekvens i jag. Det er derfor gjennomført fire analyser med forskjellig stivhet, for å se hvordan systemets stivhet påvirker Egget's bevegelse. I selve forankringsanalysen og ved sammenligning mot eksperimentelt forsøk er samme stivhet brukt, hvor modellskala stivhet er oppskalert med en skaleringsfaktor på 21.25. Systemets stivhet i jag er regnet ut ved å bruke Formel (40). Tabell 13 viser de ulike linestivhetene som er brukt i forankringsanalysene hvor  $k_1$  er oppskalert stivhet fra eksperimentelt forsøk og blir brukt som sammenligningsgrunnlag mot eksperimentell og teoretisk RAO.

Tabell 9: Stivhet

Variabel	Stivhet [kN/m]	Aksiell stivhet [kN]	Systemets stivhet [kN/m]
$k_1$	32.6	1222	32.6
$k_2$	37.3	1400	37.3
$k_3$	50	1875	50
$k_4$	76.3	2860	76.6

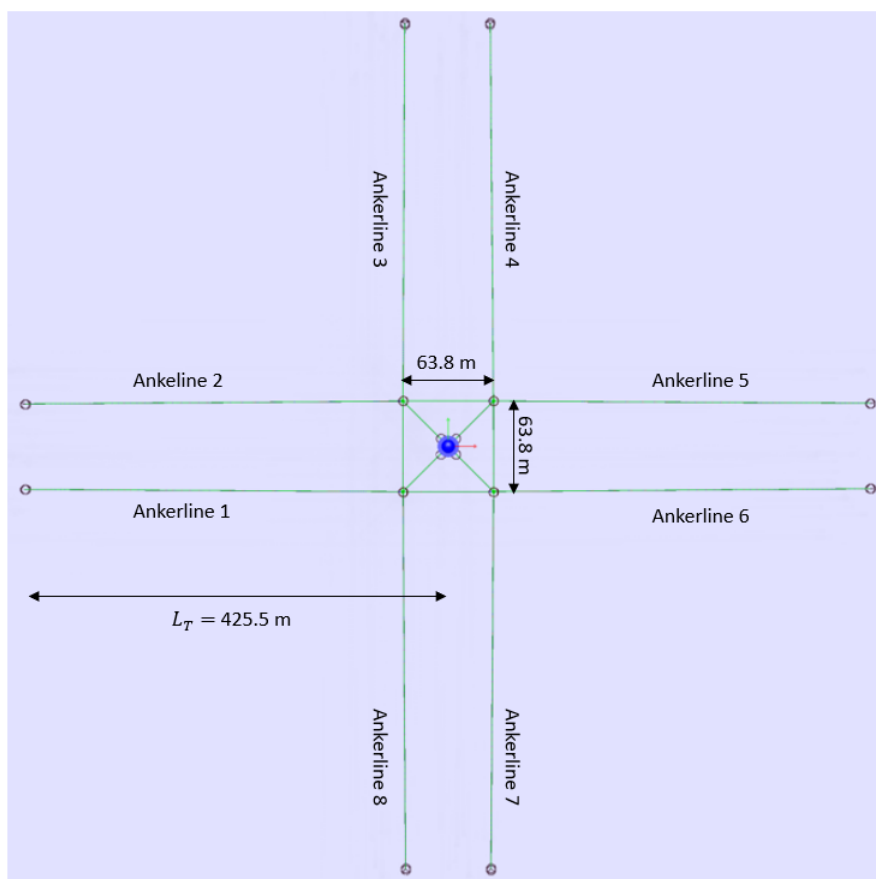
Tidssimuleringen i Sima er kjørt med parametrene som er listet opp i Tabell 10.

Tabell 10: Simuleringsparametre

Simuleringslengde	2000 s
Steglengde	0.05 s

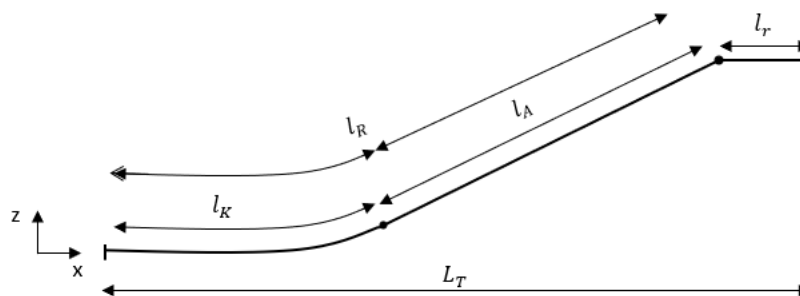
### 3.6.3 Fullstendig rammefortøyning

Ved dimensjonering av den fullstendige rammefortøyningen er det tatt utgangspunkt i et standard rammefortøyningsoppsett gitt som eksempel i Sima [35]. Selve forankringsarrangementet er satt opp som en utvidelse av det forenklede oppsettet, hvor selve rammen, oppdriftsbøyer og ankerliner er inkludert. Figur 33 viser hvordan oppsettet ser ut ovenfra, med 8 forankringsliner. Disse er festet i koblingspunkter i hvert hjørne av rammen, som også er innfestning til oppdriftsbøyene og selve Egget®.



Figur 33: Oppsett av fullstendig rammegortøyning i Sima

Rammefortøyningens horisontale og vertikale utforming er vist ved Figur 34. Her ser man hvordan ankerlinen er satt sammen av tau og kjetting med lengdene  $l_A$  og  $l_K$  og en total lengde  $l_R$ . Parameterene til hvert segment er beskrevet i Tabell 11. Ankerposisjonene er definert ved faste noder som står låst til havbunnen, de resterende sammenkoblingene mellom linene er definert med noder som avhenger av "dummy" noden beskrevet i forrige kapittel. Horisontalavstanden fra senter av Egget<sup>®</sup> til ankerposisjonene,  $L_T$ , er 425.5 m og dybden er 100m. Oppdriftsbøyene er modellert som line-elementer, med en oppdrift  $V_B \approx 49\text{kN}$  i likevektsposisjon. Bøyens parametere er også beskrevet i Tabell 11.



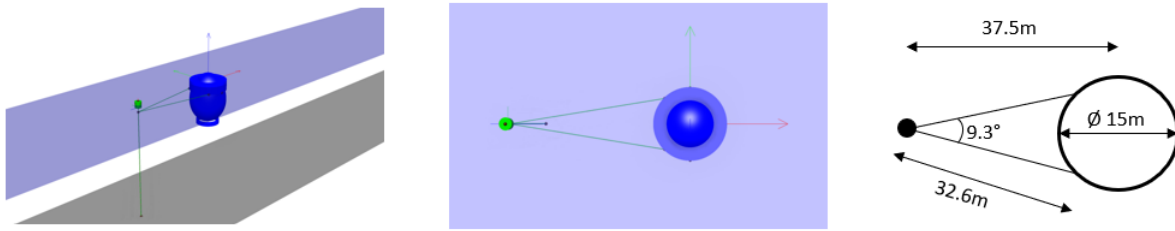
Figur 34: Ankerlinens utforming i x-z planet.

Tabell 11: Forankringslinens og oppdriftsbøyens parametre

Beskrivelse	Enhet	Kjetting	Ankerline	Oppdriftsbøye
Diameter	mm	42	64	1.2
Lengde	m	150	250	2.4
Masse koeffisient	kg/m	39.4	2	416.7
Stivhet	N/m	$5.12 \cdot 10^7$	$5.2405 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^{10}$
Ant. elementer		150	200	1

### 3.6.4 Ettpunktsforankring

Ettpunktsforankringen er satt opp med hensikt å kunne undersøke de hydrodynamiske egenskapene til Egget<sup>®</sup> når det kun er forankret i en line til havbunnen. Ved å sammenligne RAOene mot eksperimentelle forsøk kan det lages en basis på hvordan slike forankringsoppsett kan videreutvikles og valideres mot eksperimentelle forsøk. Selve forankringsoppsettet er satt opp ved å ha en stram line fra havbunnen opp til en oppdriftsbøye. Ved å ha en stram forankringsline til havbunnen blir dette konseptet en mellomting mellom svaiforankringen og svivelforankringen beskrevet i Kapittel 2.5.1. Rotasjonssenteret blir på havbunnen, men man vil unngå at en slakk ankerline kan vikle seg inn i konstruksjonen. Figur 35 viser hvordan forankringsarrangementet er satt opp i Sima.



Figur 35: Ettpunktsforankring oppsett i Sima

For å kunne sammenligne resultatene fra ettpunktsforankringen med eksperimentelle forsøk er det forsøkt å oppnå geometrisk likhet på utformingen av systemet. Parameterene som er brukt i analysen er presentert i Tabell 12. Aksialstivheten i linene er definert som konstante for å minimere påvirkningen av det elastiske bidraget. Hovedgrunnen til dette er begrunnet i muligheten for å kunne gjøre analysen repeterbar i MarinLab. For rammefortøyningen ble det brukt fjærer for å korrekte stivhet i linene, noe som ikke ble brukt på haneføttene i ettpunktsforankringen[11]. Ved valg av oppdriftsbøye ble det tatt utgangspunkt i en  $6.4\text{m}^3$  oppdriftsbøye med en netto oppdrift på  $62.8\text{kN}$ , men på grunn av tilpasninger for det eksperimentelle forsøket blir det brukt en bøye med oppdrift,  $V_B$ , på  $66.2\text{kN}$  [11].

Tabell 12: Ettpunktforankringens parametre

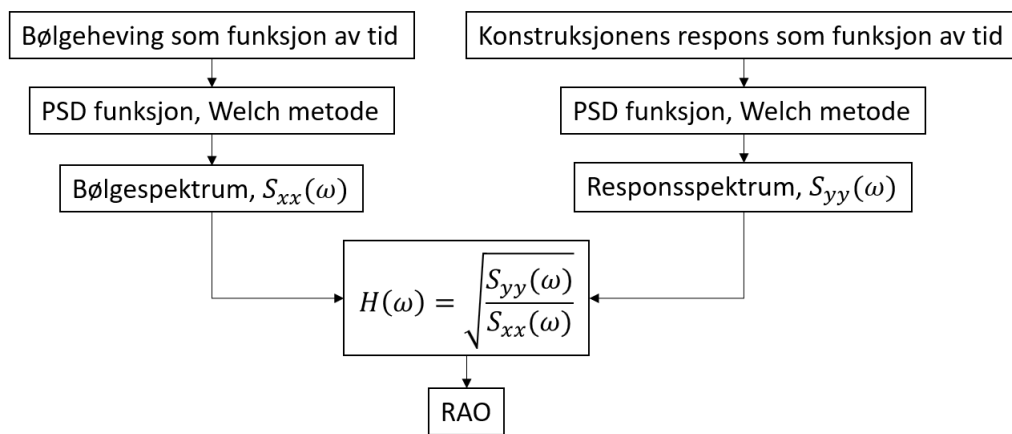
Beskrivelse	Parameter	Ankerline	Hanefot
Lengde	m	82.75	32.6
Tverrsnittsareal	$\text{m}^2$	2860	76.6
Masse koeffisient	kg/m	1.42	1.42
Aksiell stivhet	N	$4.8 \cdot 10^6$	$4.8 \cdot 10^6$

Tabell 13: Simuleringsparametre

Simuleringslengde	2000 s
Steglengde	0.05 s

### 3.7 Databehandling/postprosessering

Resultatene som blir eksportert fra Sima blir i videre behandlet i Matlab. Beregningen av RAOene fra tidssimuleringene blir i sin helhet gjennomført i Matlab, hvor hovedessensen i koden er vist ved Figur 36. Her ser man hvordan bølgehevingen og responsen som funksjon av tid blir bearbeidet for å først få ut bølge- og responsspektrum ved å bruke Welch metode. Welch metode baserer seg på FFT av en tidsserie med tilfeldig målte signal, hvor man deler opp signalet i segmenter benytter FFT for hvert vindu som videre blir satt sammen til et PSD spektrum [36]. Disse blir så brukt til å regne ut RAOene ved å løse Formel (19) med hensyn til  $H(\omega)$ .



Figur 36: Beskrivelse av hvordan RAOene blir beregnet i MATLAB

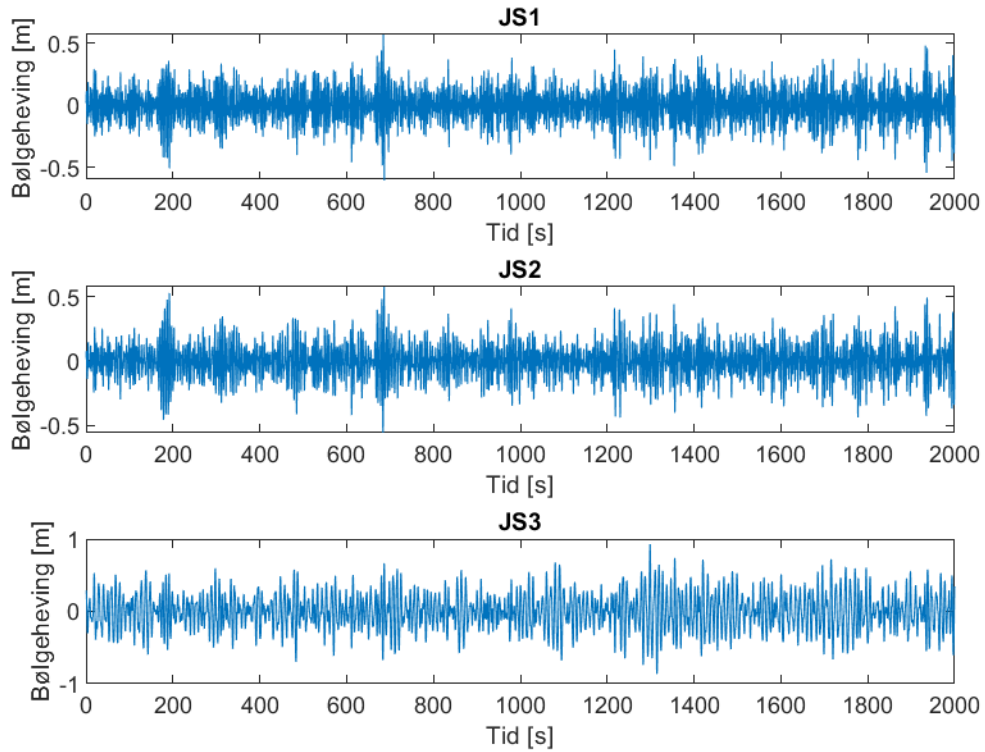


## 4 Resultat

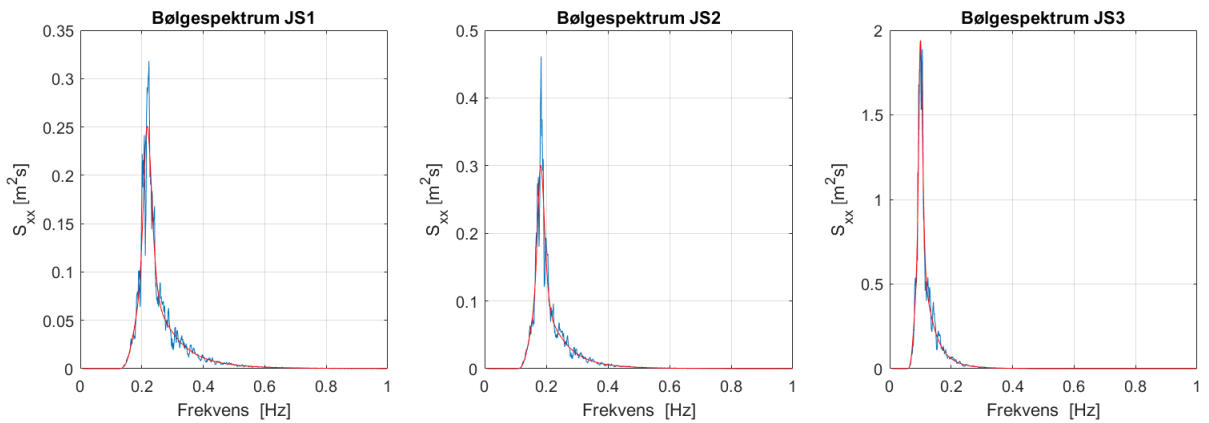
I dette kapitlet blir resultatene for de ulike fortøyningsoppsettene presentert. Resultatene er delt inn i tre, hvor første delkapittel inneholder resultatene til det forenklete oppsettet av en rammefortøyning. Her ser man responsen til Egget<sup>®</sup> ved ulike sjøtilstander og transferfunksjonene i frihetsgradene Jag, Hiv og Stamp. Resultatene for de resterende frihetsgradene ved sjøtilstand JS1, JS2 og JS3 er vedlagt i Vedlegg B. Andre delkapittel gir en forankringsanalyse av en fullstendig rammefortøyning. Her er målet å få et mer globalt bilde på bevegelsen til Egget<sup>®</sup> som kan sammenlignes med ettpunktsforankringen. I tredje delkapittel blir resultatene for ettpunktsforankringen presentert og validert. I siste del diskuteres og sammenlignes resultatene fra rammefortøyningen og ettpunktsforankringen.

Resultater fra de eksperimentelle forsøkene i MarinLab blir også inkludert for rammefortøyningen og ettpunktsforankringen. Disse er hentet fra en parallell masteroppgave [11] og oppskalert til full skala.

De simulerte sjøtilstandene fra Sima er vist i Figur 37. Disse er brukt som input for å beregne bølgespektrumene som er benyttet for videre analyse. I Figur 38 viser de blå grafene de beregnede JONSWAP bølgespektrumene fra tidssimuleringen og den rød viser teoretisk bølgespektrum som er utregnet i henhold til DNV-RP-C205 [17]. Man ser at de numeriske sjøtilstandene sammenfaller bra med teorien, men med en litt høyere pik for JS1 og JS2.



Figur 37: Bølgeheving som funksjon av tid ved sjøtilstandene JS1, JS2 og JS3

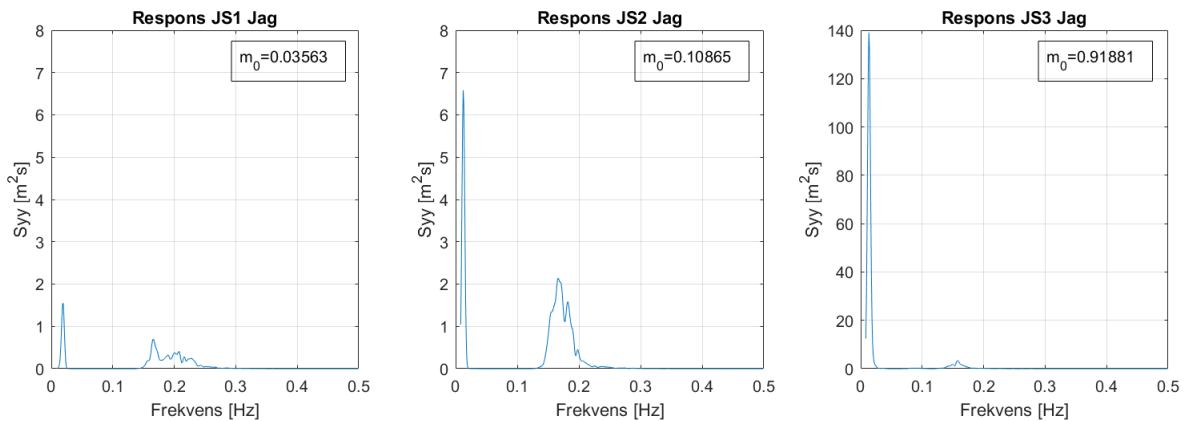


Figur 38: Sammenligning av teoretisk (rød) og simulert bølgespektrum (blå)

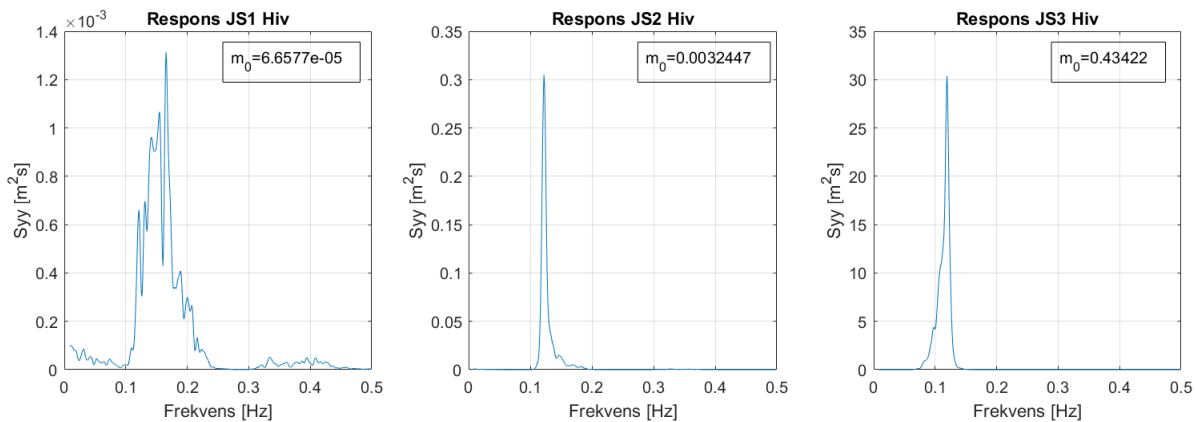
## 4.1 Forankringsanalyse 1 - Forenklet fortøyningsystem

De første resultatene er fra den forenklete rammefortøyningen, og har som mål å gi en basis for Egget's bevegelse inne i selve rammen til rammefortøynigen. Målet er også å kunne oppnå representative resultater som kan valideres og sammenlignes med eksperimentelle forsøk av samme forankringsoppsett.

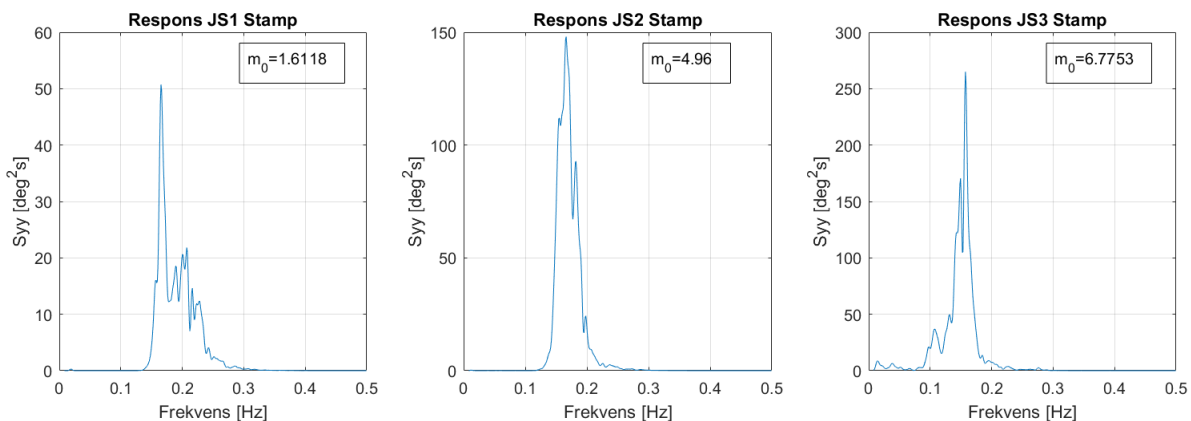
Fra de ulike sjøtilstandene er responspektrumene i frihetsgradene jag, hiv og stamp beregnet, disse er vist i Figur 39, 40 og 41. Her ser man tydelig hvordan en endring i bølgefrequensen påvirker responsen til konstruksjonen. For jag ser man en endring i responsen ved de tre sjøtilstandene, hvor responsen er størst ved JS3. Dette er forventet ettersom den signifikante bølgehøyden og pik perioden er større. Sammenligner man responsen fra JS1 og JS2 ser man at momentet er 3 ganger større for JS2. Dette viser at responsen i jag øker ved lengre bølgeperiode og bølgehøyde. For alle de tre sjøtilstandene ser man en tydelig topp i amplituden ved konstruksjonens egenfrekvens. Responsen i hiv er stort sett dominert av Egget's egenfrekvens, men man ser en liten topp i amplituden ved bølgespektrumenes toppunkt. JS3's periode ligger svært nærme konstruksjonens egenperiode i hiv, noe som kan forklare den høye responsen i hiv ved JS3. Responsen i stamp gir et toppunkt ved 0.16 Hz for alle de tre sjøtilstandene, noe som kan tyde på at konstruksjonens egenfrekvens i stamp avviker noe fra den eksperimentelle modellen. Man ser også en topp som sammenfaller med bølgespektrumet og at hivbevegelsen er med på å initiere stampbevegelsen. Momentene er større i denne frihetsgraden sammenlignet med jag og hiv, noe som er forventet ettersom responsen i stamp er relativt stor i forhold til de andre frihetsgradene.



Figur 39: Respons i jag ved JS1, JS2 og JS3

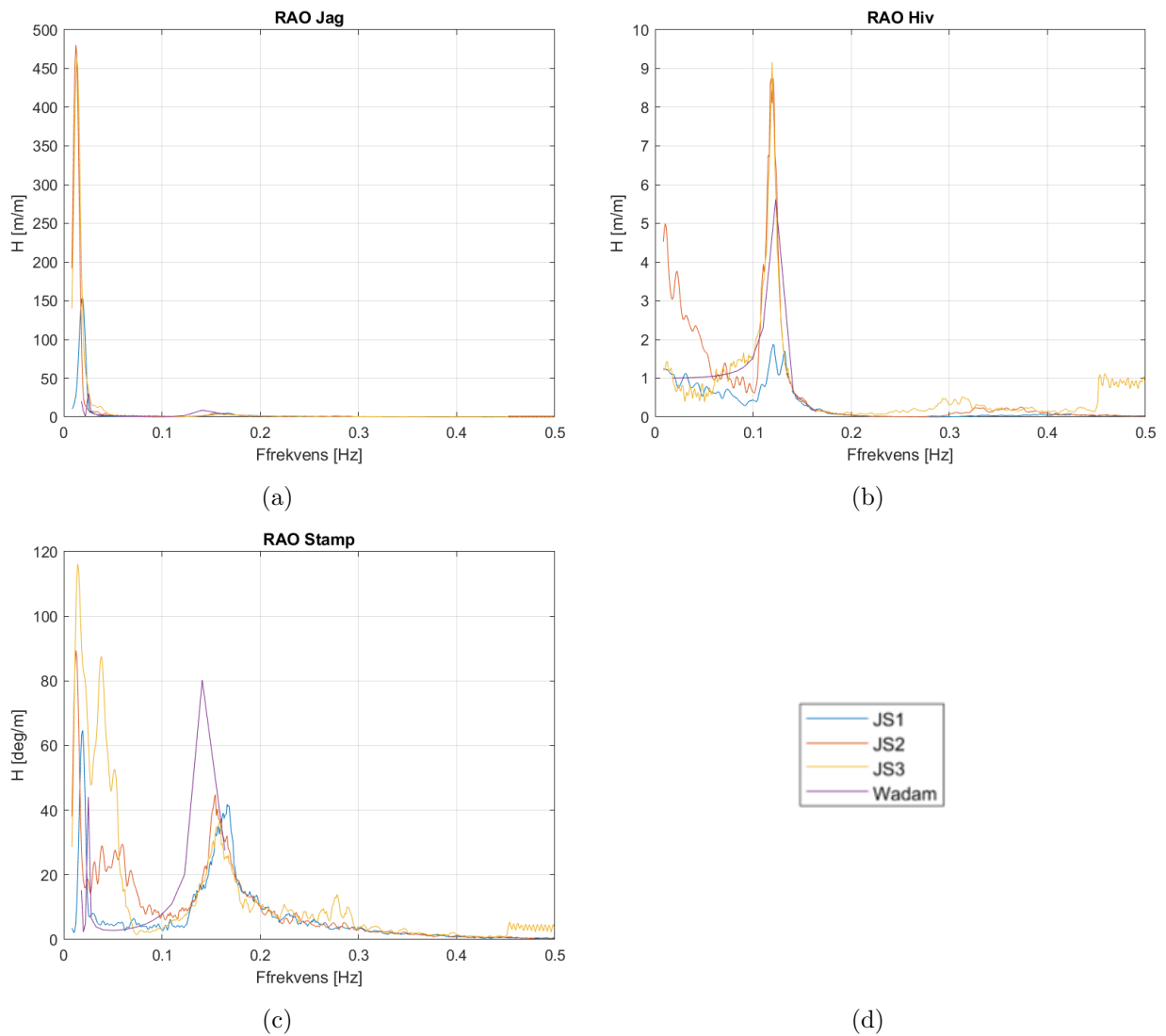


Figur 40: Respons i hiv ved JS1, JS2 og JS3



Figur 41: Respons i stamp ved JS1, JS2 og JS3

RAOene til frihetsgradene jag, hiv og stamp ved de tre sjøtilstandene samt teoretisk beregnet RAO er vist i Figur 42. Her ser man de samme tendensene for de gitte frihetsgradene for hver sjøtilstand og de sammenfaller bra med den teoretiske RAOen som er beregnet i WADAM. Amplituden er noe høyere ved sjøtilstanden JS3, noe som kan skyldes større respons.



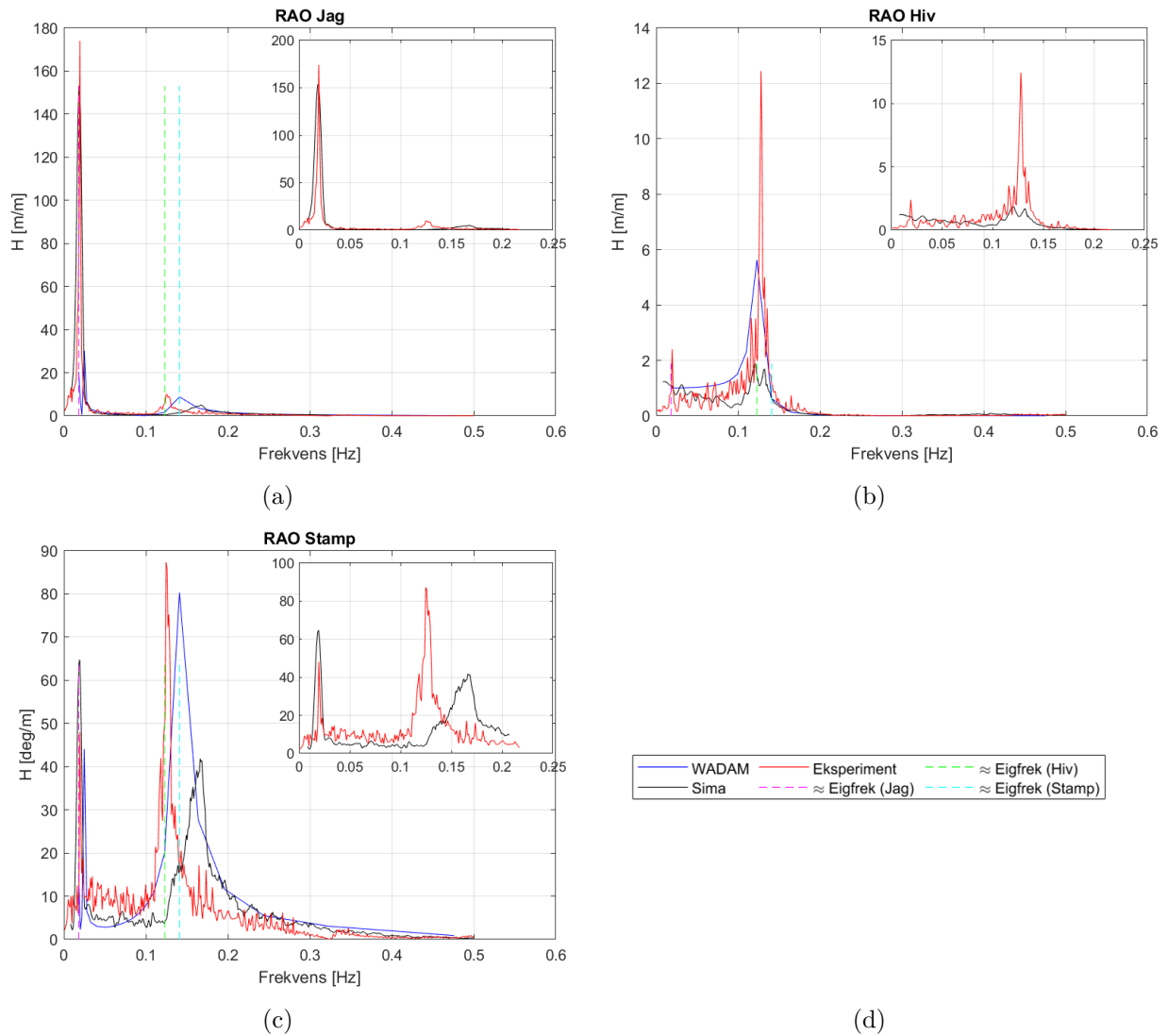
Figur 42: Sammenligning av RAO fra de ulike sjøtilstandene

Som en del av valideringen av de numeriske og eksperimentelle resultatene blir egenfrekvensene fra eksperimentell decay-test [11] sammenlignet mot egenfrekvensene hentet fra Wadam for de teoretiske RAOene. Tabell 14 egenfrekvensene med prosentvis avvik. Her ser man størst avvik i stamp.

Tabell 14: Sammenligning av egenfrekvens med forankring

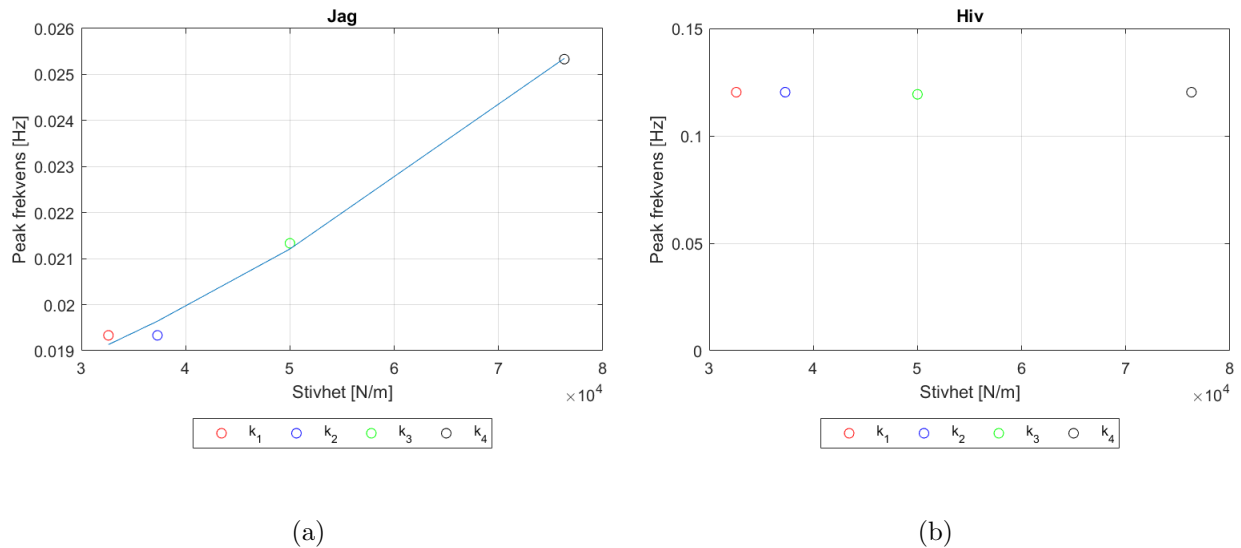
Frihetsgrad	Numerisk egenfrekvens[Hz]	Eksperimentell egenfrekvens [Hz]	% Avvik
Jag	0.019	0.020	5%
Hiv	0.123	0.128	4%
Stamp	0.141	0.123	14.6%

I Figur 43 ser sammenligning mellom RAO fra analysen i tidsplanet, teorien og eksperimentet med sjøtilstanden JS1. For jag sammenfaller RAOene bra og man ser en distinkt topp ved egenfrekvensen rundt 0.02 Hz. I den numeriske RAOen er det en topp ved 0.16Hz som man ser igjen i RAOen for stamp. Dette toppunktet avviker mellom eksperimentell, numerisk og teoretisk RAO, hvor det legger seg ved egenfrekvensen i hiv i den eksperimentelle RAOen. RAOene i hiv sammenfaller også bra mellom eksperiment og numeriske analyser. Fra eksperimentet har man en distinkt topp ved 0.128 Hz, denne ser man også igjen i den teoretiske RAOen hvor egenfrekvensen er på 0.123Hz. Amplituden fra tidssimuleringen er noe mindre og ikke like distinkt som ved de to andre. For stampbevegelsen ser man et tydelig utslag i amplituden ved 0.02 Hz, som er egenfrekvensen til jag. Dette indikerer at responsen i stamp også blir påvirket av bevegelsen i jag. Fra de simulerinen i tidsplanet legger den dimensjonerende toppen seg ved 0.16 HZ, dette avviker litt sammenlignet med de teoretiske og eksperimentelle resultatene hvor toppen legger seg på henholdsvis 0.141 og 0.123 Hz.



Figur 43: Sammenligning mellom numeriske og eksperimentelle RAOer

Det er også gjort en undersøkelse på hvordan ulike linestivheter påvirker egenfrekvensen til Egget<sup>®</sup> når det er forøyd i rammen. Teoretisk er stivheten,  $k$ , proporsjonal med egenfrekvensen kvadrert. Figur 44a viser hvordan egenfrekvensen øker ved økt stivhet for jag. Her er det også plottet et andregrads polynom som viser at teorien gjenspeiles i praksis. For hiv er egenfrekvensen tilnærmet konstant, men med en liten forskjell ved  $k_3$  på 0.001Hz.



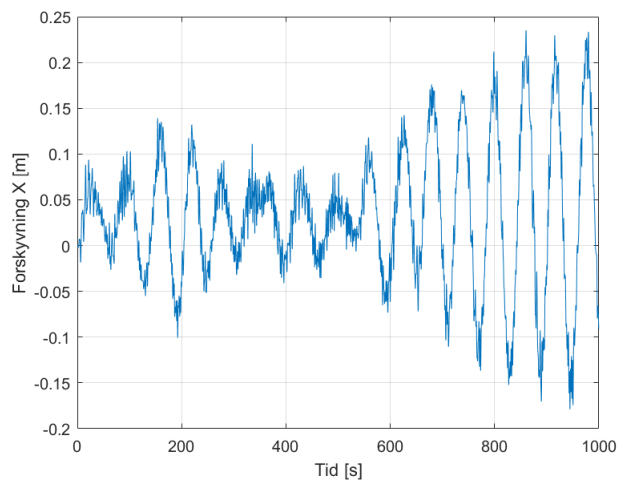
Figur 44: Egenfrekvens som funksjon av stivhet

## 4.2 Forankringsanalyse 2 - Fullstendig rammefortøyning

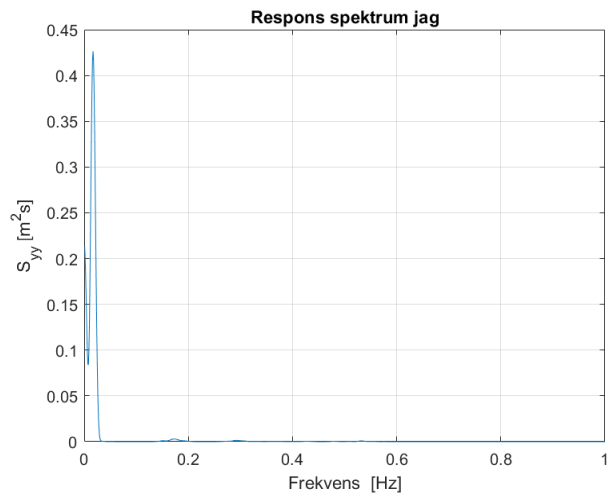
Den fullstendige rammefortøyningen er en utvidelse av det forenklede oppsettet og har til hensikt å gi et mer globalt bilde på hvordan Egget<sup>®</sup> beveger seg sammenlignet med ett-punktsforankringen. Ved å se på hele forankringssystemets påvirkning på Egget<sup>®</sup> vil man få et bedre inntrykk av hvordan den totale bevegelsen er når det er forankret til havbunnen.

Figur 45 viser responsen til Egget<sup>®</sup> for frihetsgradene jag, hiv og stamp ved sjøtilstanden JS1. Responsen er brukt til å beregne RAOen til Egget<sup>®</sup> på samme måte som den forenklede rammefortøyningen. Forskjellen på i responsen til de to rammefortøyningene ligger i stivheten til systemet, hvor den fullstendige rammefortøyningen har bidrag fra ankerlinene og oppdriftsbøyene. Derfor forventes det lavere frekvent bevegelse i jag, som gjenspeiles i responsen i Figur 45. Midlere forskyvning i x-retning er 0.03m og maks forskyvning er 0.24m. I hiv er det veldig liten respons, Egget<sup>®</sup> beveger seg kun noen centimeter i z-retning. I stamp roterer Egget<sup>®</sup> mellom  $-0.5^\circ$  og  $0.7^\circ$

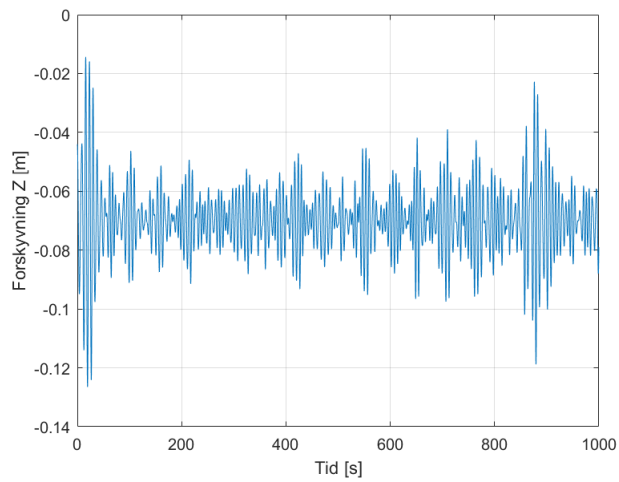




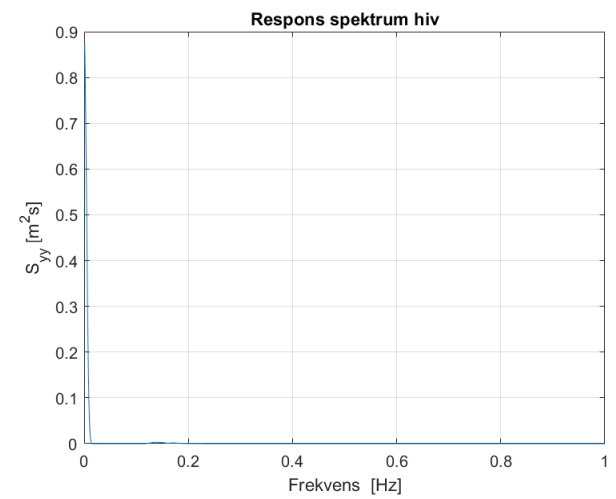
(a)



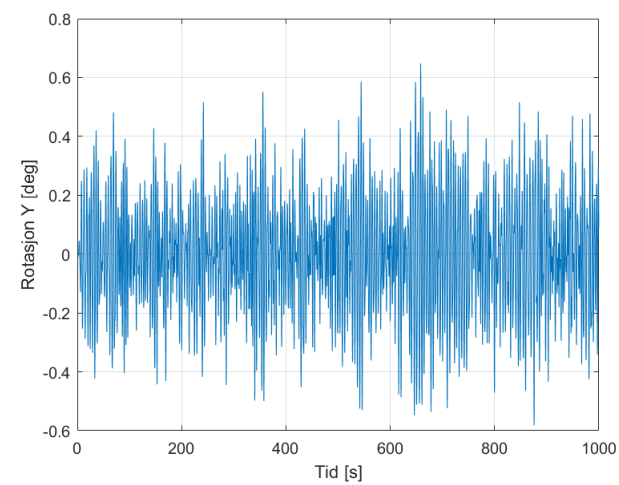
(b)



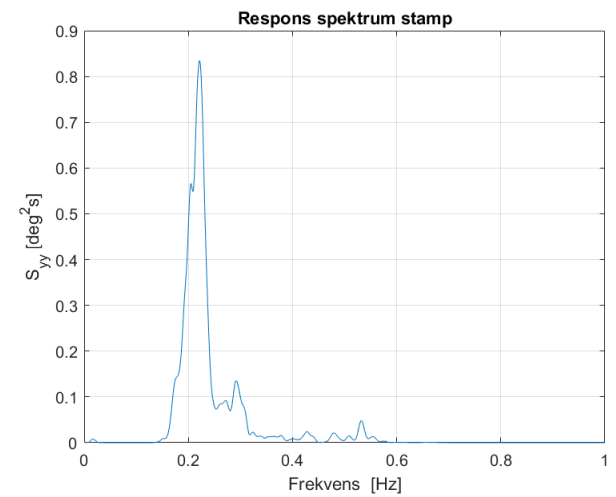
(c)



(d)



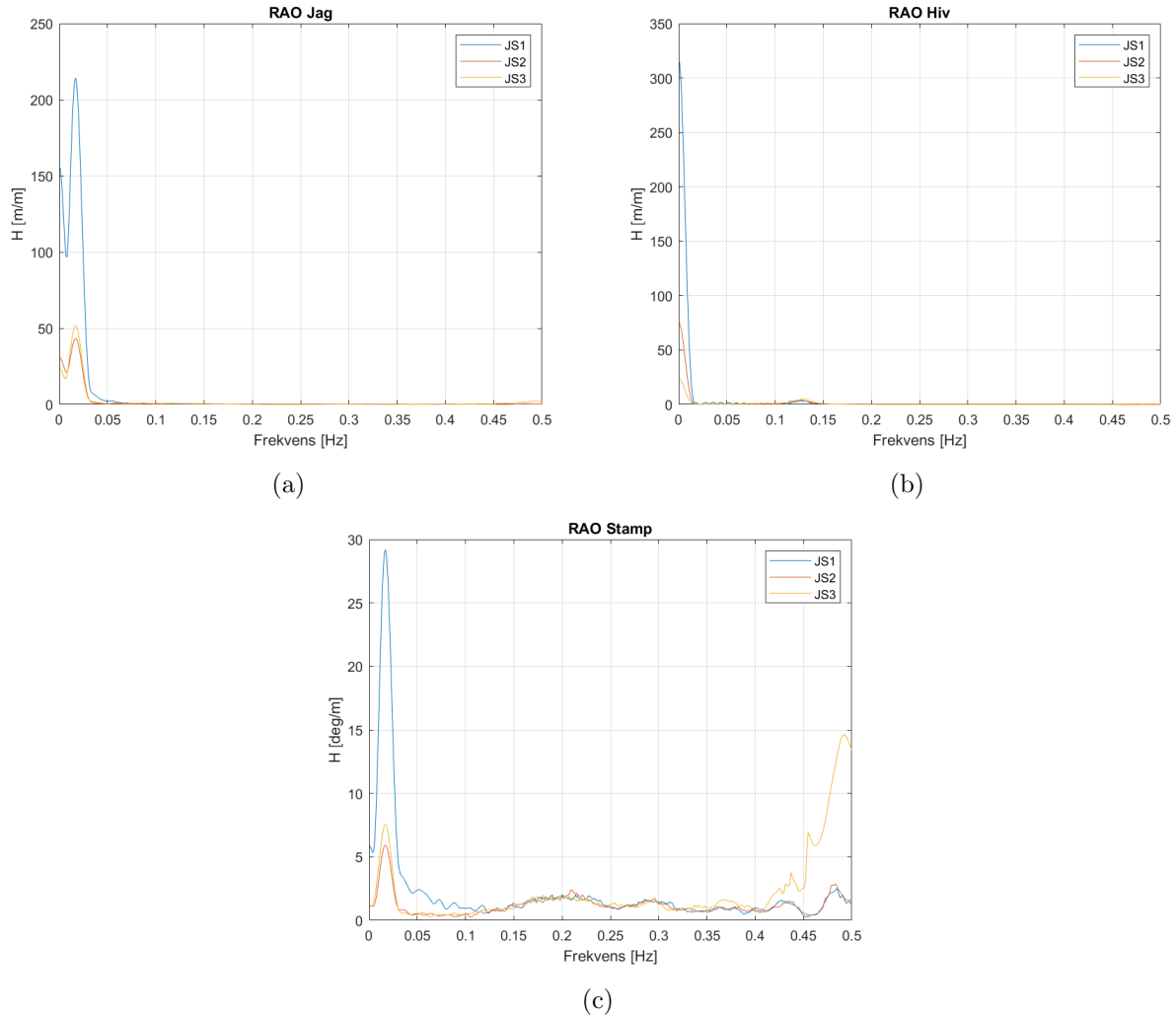
(e)



(f)

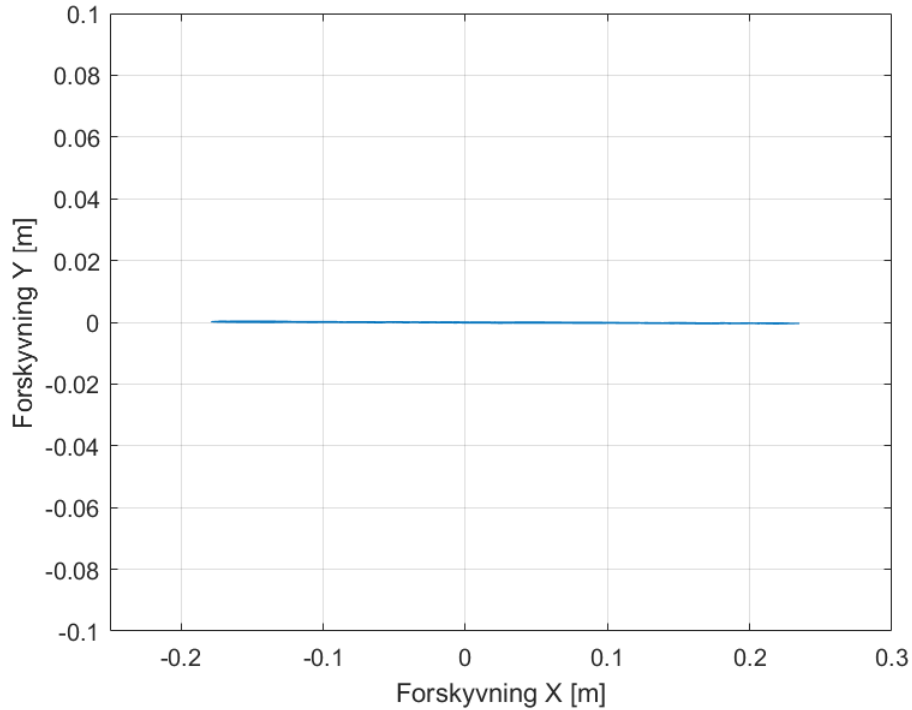
Figur 45: Responsen ved fullstendig rammefortøyning i jag, hiv og stamp

Ser man på RAOene til jag legger ser med svært lav frekvens ser man en topp ved 0.017Hz. For hiv ser man igjen den samme toppen ved konstruksjonens fire egenfrekvensen i hiv på 0.13 Hz. RAOen for stamp gir utslag i hele frekvensspekteret, men man ser en tydelig topp ved lav frekvens, som kan forklares med interaksjonen mellom jag og stampbevegelsen.



Figur 46: Sammenligning RAO fra simuleringer i tidsplanet ved JS1, JS2 og JS3

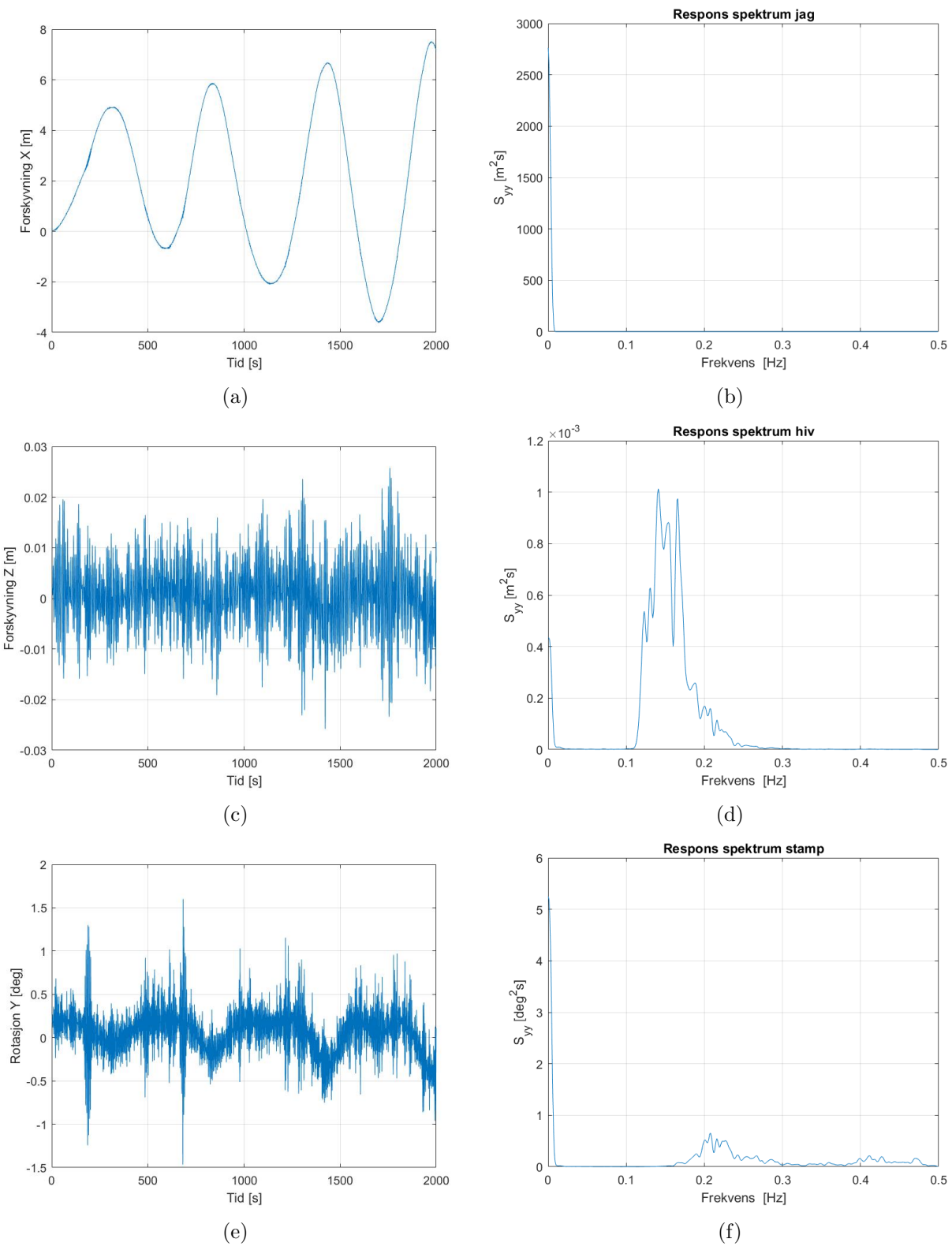
Figur 47 viser Eggets bevegelse i x-y planet. Her er jag og svai bevegelsen plottet mot hverandre for å se posisjoneringen til konstruksjonen ved sjøtilstand JS1. Man ser tydelig at Egget<sup>®</sup> beveger seg veldig lite både x-og y-retning er det minimal bevegelse. Sjøtilstanden spiller inn her, samtidig som strøm ikke blir inkludert i analysen. Ankelinens materialparametere og forspenning er også med å bidrar til så liten forskyvning.



Figur 47: Egget's forskyvning i x-y planet

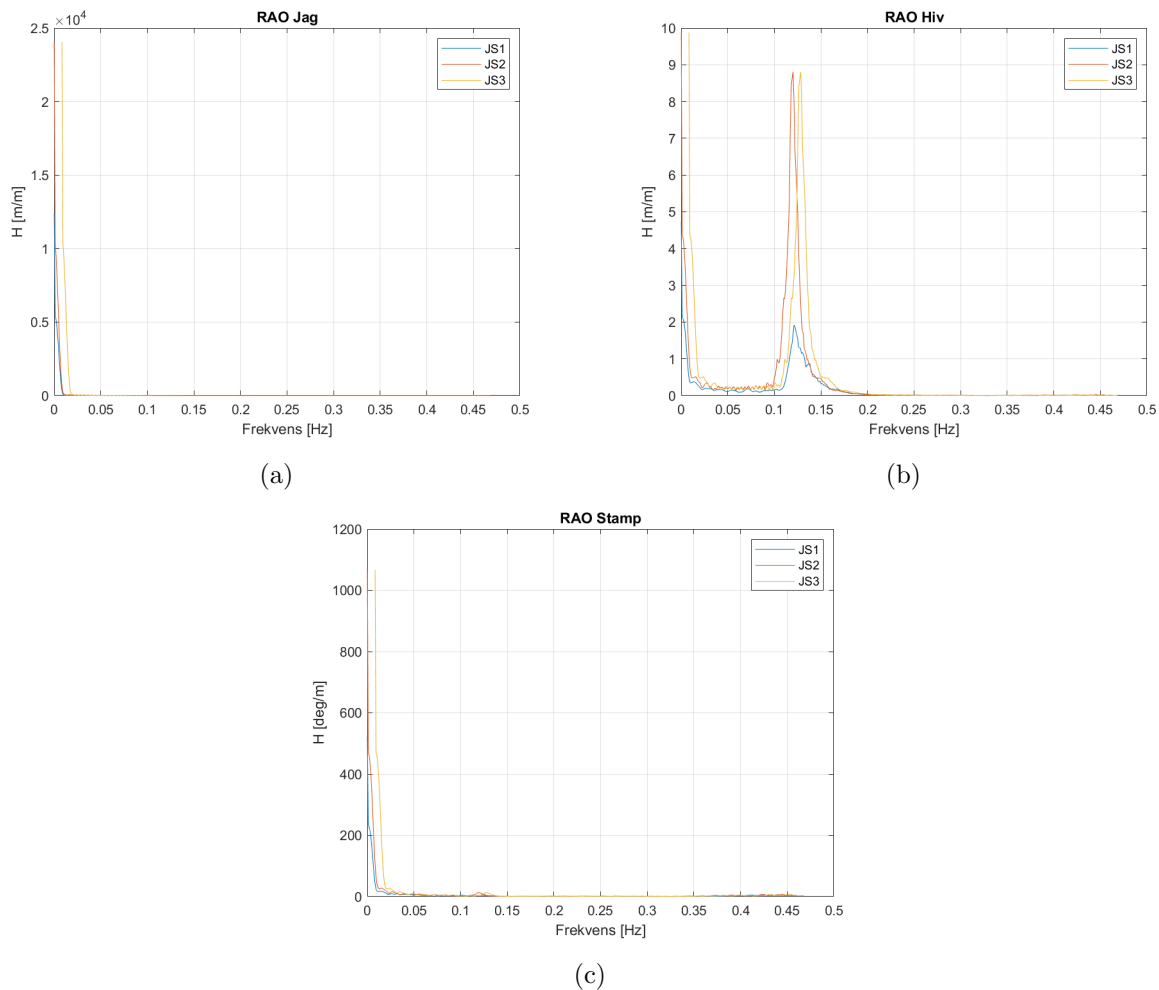
### 4.3 Forankringsanalyse 3 - Ettpunktsforankring

Responsen til Egget<sup>®</sup> for frihetsgradene jag, hiv og stamp er vist i Figur 48. Her ser man at jagbevegelsen er dominert av en veldig lavfrekvent bevegelse, med relativt stor forskyvning. Den lavfrekvente responsen speiles igjen i responspektromet. Maks forskyvning er tilnærmet 7.6m, og midlere forskyvning er 1.9m. For hivbevegelsen ser man en dominant respons i intervallet 0.1 til 0.25 Hz, noe som er forventet da bølgens topperiode speiles igjen i responsen. Rotasjonen i stamp gir utslag på tilnærmet hele frekvensspekteret, dette forklares med forankringens innfestning på Egget<sup>®</sup>. Som vist i Kapittel 3.6.4 er innfestningen festet på den ene siden av konstruksjonen, og vil være med å motstå rotasjon i stamp.



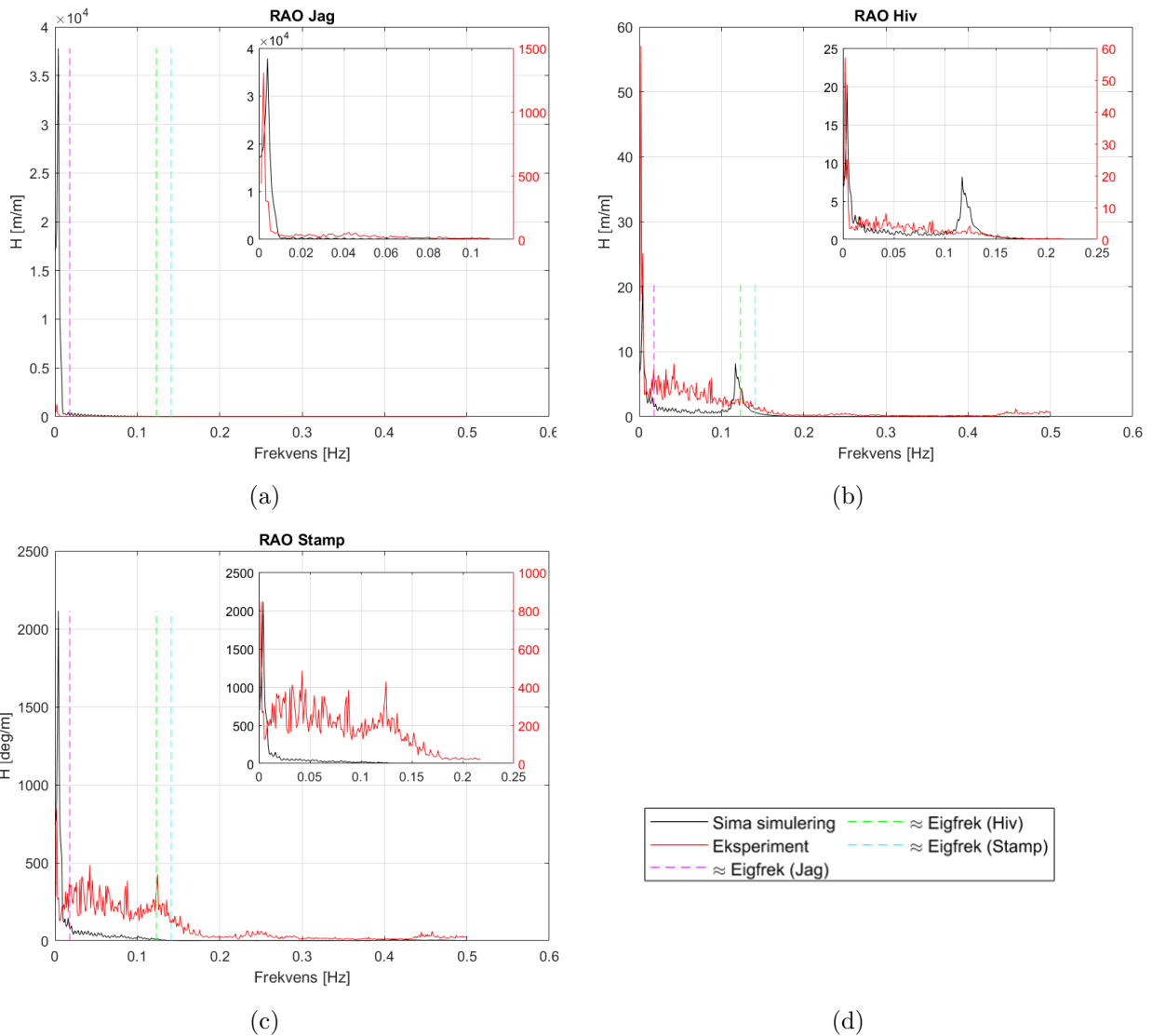
Figur 48: Responsen ved ettpunktsforankring i jag, hiv og stamp

RAOene for de tre sjøtilstandene er vist i Figur 49. Her ser man igjen de samme tendensene for alle de tre sjøtilstandene, men amplituden for JS2 og JS3 er høyere enn for JS1. Som diskutert ovenfor er jag tydelig dominert av lav frekvens, noe som gjenspeiles i RAOen.



Figur 49: Sammenligning RAO fra simuleringer i tidsplanet ved JS1, JS2 og JS3

Sammenligner man numerisk bergegnet RAO mot eksperimentell RAO ser man samme tendenser, men amplituden avviker mellom de to metodene. Den numeriske RAOen for jag viser en signifikant stigning ved lavere frekvens, og avtar noe hvor toppunktet til den eksperimentelle RAOen er før den går mot uendelig. For hiv ser man en pik ved konstruksjonens egenfrekvens i begge RAOene. I den eksperimentelle RAOen er det utslag i amplituden ved flere frekvenser enn ved den numeriske. Også her ser man samme tendenser som ved jag ved svært lave frekvenser.



Figur 50: Sammenligning av simulert og eksperimentell RAO for ettpunktsfortøyning

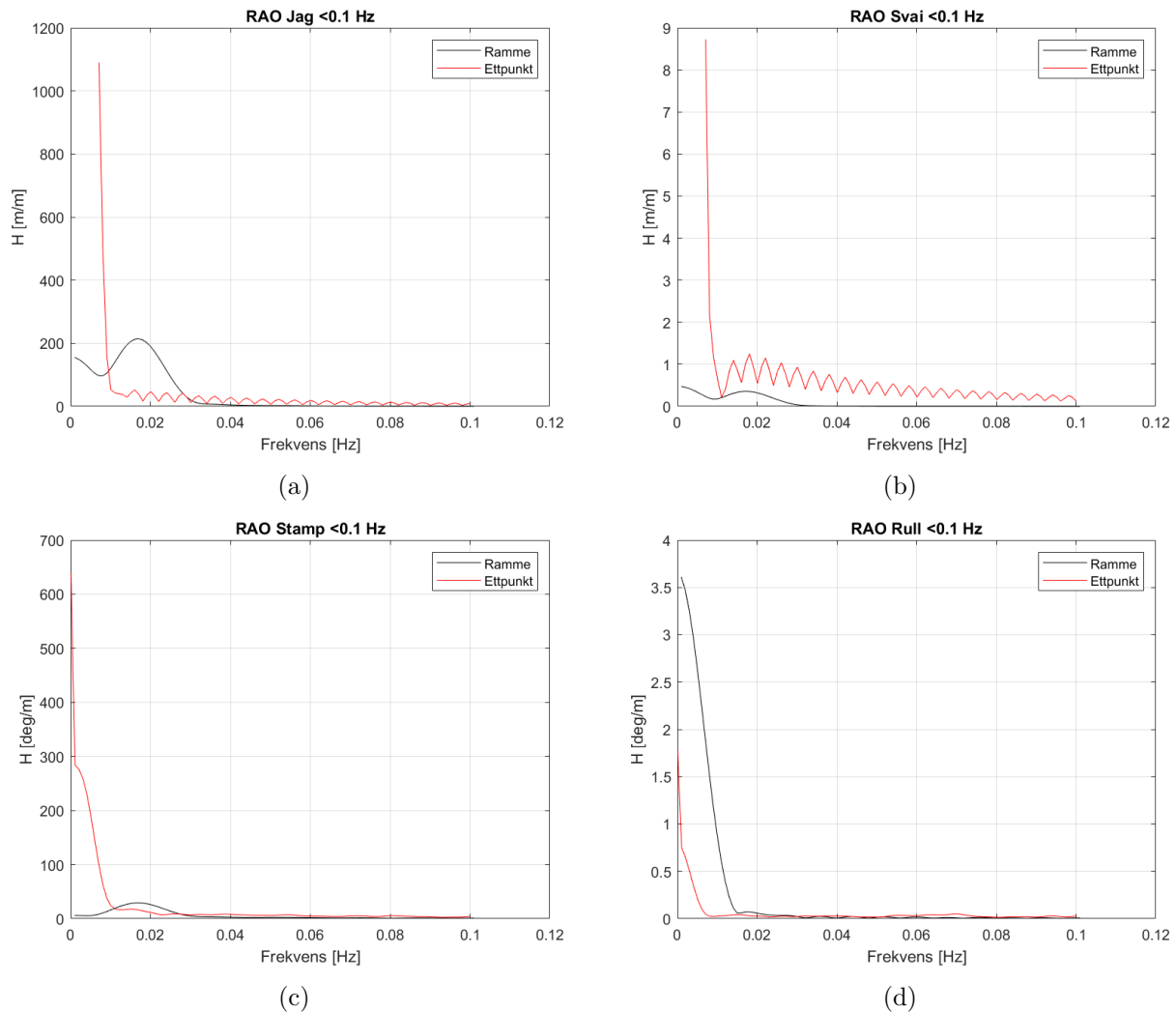
## 4.4 Sammenligning av rammefortøyning og ettpunktsforankring

Ved sammenligning av den fullstendige rammefortøyningen og ettpunktsforankringen blir de globale bevegelsene i jag og svai sammenlignet ved lave frekvenser ( $<0.1$  Hz). Videre blir RAOene ved høyere frekvenser (0.1-1 Hz) sammenlignet for hiv, stamp og rull. Da det er dette frekvensintervallet som gir opphav til det som skal dimensjonere selve systemet.

### 4.4.1 Sammenligning av RAO $<0.1$ Hz

Sammenligner man RAOene til den fullstendige rammefortøyningen og ettpunktsforankringen ved frekvenser mindre enn 0.1 Hz ser man tydelige forskjeller i RAOene i frihetsgradene jag,

svai og stamp. Dette er vist ved Figur 51. For jag og stamp ble det i Kapittel 4.3 observert at bevegelsen med ettpunktsforankringen er dominert av lave frekvenser, og amplituden går mot uendelig ved svært lave frekvenser. Bevegelsen til Egget<sup>®</sup> i rammefortøyningen gir også utslag ved lave frekvenser, men ikke like mye som ettpunktsforankringen. I RAOen til jag og stamp ved rammefortøyning ser man den en topp i amplitude ved egenfrekvensen i jag og stamp ved 0.019 Hz. RAOen i rull viser samme tendenser ved de to forankringssystemene, men amplituden er høyere i ettpunktsforankringen.

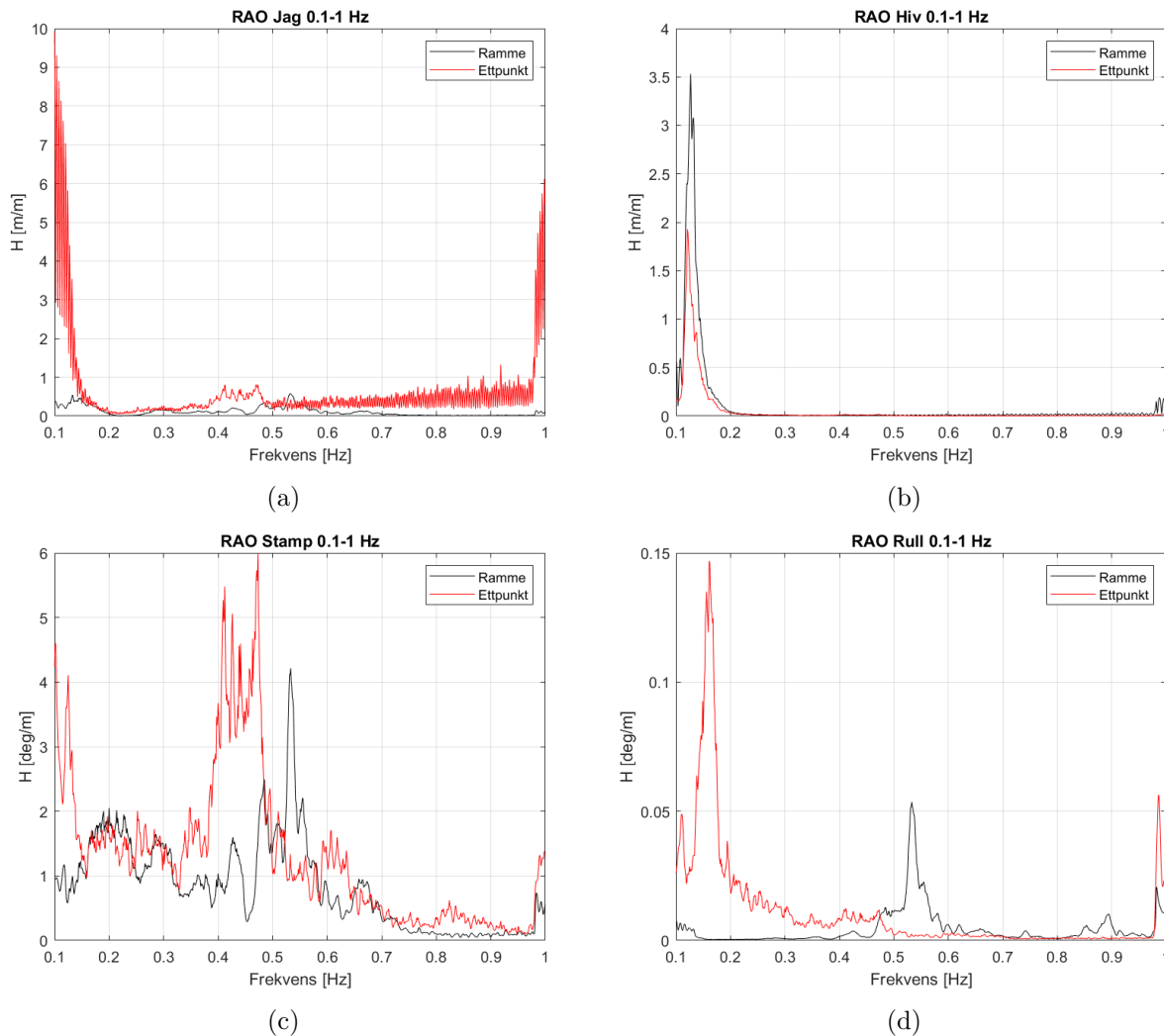


Figur 51: Sammenligning av RAO for ettpunktsforankring og fullstendig rammefortøyning

#### 4.4.2 Sammenligning av RAO 0.1-1 Hz

Ved høyere frekvenser er det forventet at det er mindre bevegelse i hiv, stamp og rull. Dette ser man igjen i Figur 52, hvor RAOene i jag, hiv, stamp og rull er presentert ved frekvenser

mellom 0.1 Hz og 1 Hz. I RAOen for jag ser man forskjeller i amplituden mellom de to forankringssystemene, men det er også i denne frihetsgraden det er mest bevegelse. I RAOen for hiv ser man tilnærmet like amplituder, med en distinkt topp ved 0.12 Hz, som er egenfrekvensen i hiv. RAOen i stamp gir utslag over hele frekvensintervallet, hvor amplitudene ligger i samme størrelsesorden. For ettpunktsforankringen ser man en høyere amplitude mellom 0.4 og 0.5 Hz, men for rammefortøyningen har man et toppunkt ved 0.53 Hz. den samme toppen ser man igjen i RAOen til rammefortøyningen i rull.

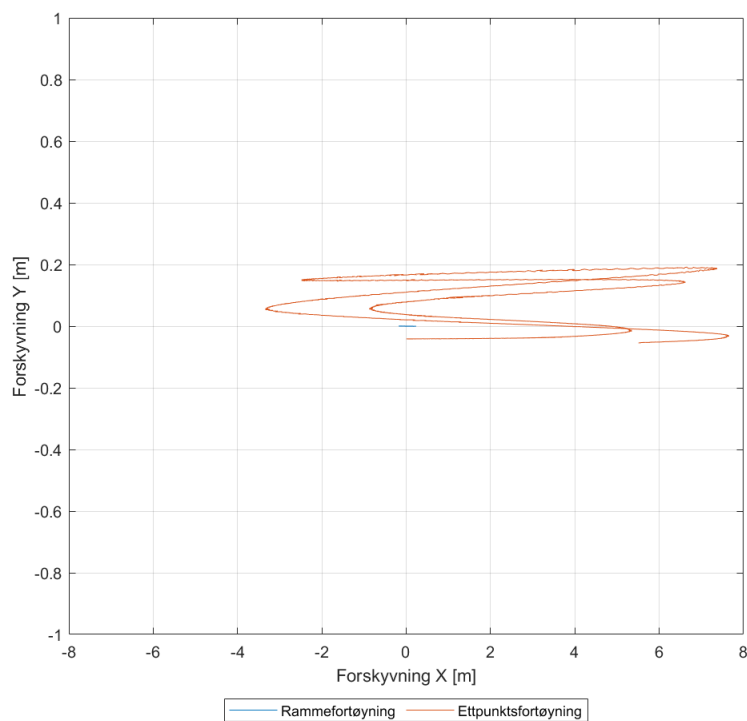


Figur 52: Sammenligning av RAO for ettpunktsforankring og fullstendig rammefortøyning ved 0.1-1 Hz



### 4.4.3 Global forskyvning og arealbeslag

Ser man på forskyvningen i x-y planet ved rammefortøyningen og ettpunktsforankringen ser man utsving i både x- og y-retning er større for ettpunktsforankringen. Dette er forventet med tanke på at ettpunktsforankringen kun har en forankringsline, og rammefortøyningen har 8. Rammefortøyningen har også forankringslinjer som motstår bevegelsen i svai, som forklarer den lave forskyvningen i denne frihetsgraden. Figur 53 viser Eggets bevegelse for begge forankringene i x-y planet. Egget's bevegelse i horisontalplanet vil være med å påvirke samspillet mellom hovedkomponentene og ekstrautstyret i havbruksanlegget, det er derfor viktig å ta hensyn til dette ved utforming av forankringssystemet.



Figur 53: Sammenligning av forskyvning i x-y planet ved rammefortøyning og ettpunktsforankring

For å gjøre et forenklet anslag på hvordan overflate- og bunnarealet som blir beslaglagt av de to forskjellige forankringssystemene som er analysert i denne oppgaven kan man ta utgangspunkt i maks forskyvning. Da kan man regne ut det maksimale arealet ved innkommende sjø fra  $360^\circ$  ved å anta at maks forskyvning er lik for alle vinkler. I denne oppgaven blir det ikke tatt hensyn til strøm og for å gjøre det mer nøyaktig bør det undersøkes for 10- og 50-års miljølast. Ved beregning av arealbeslaget til ettpunktsforankringen blir det antatt at Egget<sup>®</sup>

roterer i en sirkel med radius lik avstand til bøyen addert med maks forskyvning. Dette gir et overflateareal på  $6407 \text{ m}^2$ . For rammefortøyning blir arealet regnet ut ved å betrakte hver side i rammefortøyningen addert med maks utsving. Dette gir et arealbeslag på  $4130 \text{ m}^2$ . Her ser man at ettpunktsforankringen vil ta større plass på overflaten, noe som påvirker hvilke lokasjoner som er egnet for en slik type forankringssystem. For rammefortøyningen er bunnarealet regnet ut ved å beregne arealet mellom de 8 ankerpunktene, noe som gir i overkant av  $274000 \text{ m}^2$ . For ettpunktsforankringen er beslaglagt bunnareal vesentlig mindre.

## 4.5 Feilkilder

Det kan knyttes en del feilkilder og usikkerhetsmomenter til de numeriske og eksperimentelle resultatene som er viktig å ta hensyn til ved sammenligning av resultatene.

- Den geometriske likheten til de numeriske testoppsettene sammenlignet med det eksperimentelle oppsettet kan avvike noe fra hverandre. Egget's geometri er skalert i henhold til Froude's skaleringsregler, men den numeriske modellen er noe forenklet. Den eksperimentelle modellen har gjengestag som fester bunnringen til selve konstruksjonen. Disse er ikke inkludert i den numeriske modellen. Tankveggen kan også pille inn på Eggets respons i tanken, denne er ikke inkludert i de numeriske beregningene.
- Det er antatt at fjærene i de eksperimentelle forsøkene av rammefortøyningen har en konstant stivhet, men det ble observert en endring i stivhet på grunn av geometrisk deformasjon etter forsøket [11]. Det kan derfor antas at stivheten kan variere noe fra det som er tatt utgangspunkt i ved validering mot eksperimentelle resultater. Derfor er det utført en egen case-studie for å se på effekten av endring i systemets stivhet og systemets egenfrekvens i fullskala simuleringene.
- Simuleringslengde kan også spille inn på resultatene. I MarinLab ble det kjørt 40minutters tidsintervaller på de irregulære sjøtilstander [11]. Dette tilsvarer en 3 timers (10800s) sjøtilstand i full skala. I de numeriske analysene som valideres er simuleringslengden 2000 sekund.
- Bevegelsen til det indre vannvolumet er også et usikkerhetsmoment. Det er tatt hensyn til fri overflateeffekt i de numeriske analysene, men om partikkelhastighetene og -akselerasjonene er like for modellskala og fullskala forsøk er usikkert.

## 5 Konklusjon

Målet med denne oppgaven har vært å undersøke ulike forankringssystemer for den lukkede akvakulturenheten Egget<sup>®</sup>. Lukkede enheter for oppdrett av laks er en relativt nyutviklet teknologi, og det forskes på hvilke hydrodynamiske egenskaper som er dimensjonerende sammenlignet med tradisjonelle oppdrettsmerder. Forskjellen i utformingen av dagens oppdrettsmerder og Egget<sup>®</sup> gjør det interessant å utforske andre metoder ved posisjonen av konstruksjonen. Det er derfor undersøkt hvordan ulike forankringssystemer påvirker Egget's bevegelse, hvor to modeller av rammefortøyning og et konsept av en ettpunktsforankring har blitt numerisk analysert og validert mot eksperimentelle tester og sammenlignet mot hverandre.

Som et bakgrunnsarbeid før selve forankringsanalysene ble det gjennomført hydrostatisk og hydrodynamisk analyse. Egget<sup>®</sup> ble først modellert som en oppskalert konstruksjon fra modellskala Egget som ble brukt i eksperimentene i en parallell masteroppgave [11]. Fra den hydrostatiske analysen ble det beregnet en  $\overline{GM}$  på 1.06 m, noe som stemmer bra overens med den eksperimentelle  $\overline{GM}$ en på 0.99 m oppskalert til full skala. Videre ble en stabilitetsanalyse gjennomført i henhold til NS9415. Den hydrodynamiske analysen i frekvensplanet dannet grunnlaget for inngangsdataene til forankringsanalysen. Her ble det beregnet RAO for de seks frihetsgradene til Egget<sup>®</sup>, samt tilleggsmasse og dempning.

Forankringsanalysene ble gjennomført med tre forskjellige sjøtilstander hvor simulert bølgespektrum og responsspektrum ble beregnet. Ut ifra disse ble RAOene til det forankrede Egget<sup>®</sup> beregnet. Hovedtrekkene fra den forenklete rammefortøyningen viser samme tendenser både mellom de tre sjøtilstandene og sammenlignet mot eksperimentelle resultater. For frihetsgradene jagg og hiv får man tilnærmet samme RAOer, men for stamp er det et lite avvik hvor egenfrekvensen fra den numeriske tidssimuleringen har noe høyere frekvens.

Resultatene fra fullstendig rammefortøyning gir et mer globalt bilde på hvordan hele forankringssystemet påvirker Egget<sup>®</sup>. Her ser man at forskyvningen er relativt liten og konstruksjonen holdes i posisjon ved de ulike sjøtilstandene. Ved ettpunktsforankring ser man en større forskyvning, særlig i jagg retning, noe som er forventet. Ved å bruke ettpunktsforankring vil man beslaglegge et større område, noe som kan være utfordrende i trange fjorder. På mer eksponerte lokaliteter vil dette ha mindre å si.

Det er vanskelig å svare konkret på om ettpunktsforankring er en reell løsning for forankring av Egget<sup>®</sup> fordi det er nødvendig å ta hensyn til enda flere aspekt ved dette konseptet. Man er avhengig av å undersøke hvordan man kan løse kravet om samspill mellom hovedkomponentene i et akvakulturanlegg samt de operasjonelle utfordringene som kan forekomme ved ettpunktsforankring. Selv om det er mange utfordringer knyttet til ettpunktsforankringen har den potensiale til videre utvikling, og det er mulig at denne forankringsmetoden kan løse problemstillinger som kan dukke opp når man vet enda mer om Egget's hydrodynamiske egenskaper. Når det er sagt er rammefortøyning en standardisert metode for å forankre oppdrettsanlegg, og ved å oppdimensjonere disse til å motstå lastene som Egget<sup>®</sup> utsettes for vil man kunne integrere Egget<sup>®</sup> i allerede etablerte oppdrettsanlegg. På den måten vil man sørge for godt samspill i alle ledd i akvakulturanlegget.

## 6 Videre arbeid

Som det ble konkludert med i denne oppgaven er det flere aspekter som må tas hensyn til for å kunne avgjøre om ettpunktsforankring er en reell forankringsmetode for Egget<sup>®</sup>. Under er det listet opp noen punkter som det kan være aktuelt å jobbe videre med.

- I denne oppgaven er det kun tatt hensyn til innkommende bølger fra én retning. Ved videre undersøkelser av forankringen til Egget<sup>®</sup> vil det være nødvendig å undersøke responsen ved innkommende bølger fra flere vinkler, samt hvilken påvirkning strøm har på konstruksjonen. Ved å se på ulike kombinasjoner av miljølastene vil man kunne underbygge flere fordeler og ulemper med de to forankringssystemene.
- Hvordan ettpunktsforankringen kan utvikles for å kunne forankre flere enheter i samme system er også noe som kan undersøkes videre. Et eksempel på dette ble vist i Kapittel 2.5.1, hvor flere flyteringer var festet i et system til fôrflåten. Her er man avhengig av å sikre samvirke mellom hovedkomponentene og ekstrautstyr i henhold til NS9415 [31].
- For å kunne vurdere de to forankringssystemene mot hverandre bør kostnadene ved begge systemer undersøkes. Det kan derfor gjennomføres en kostnadsanalyse av de to forankringsmetodene.

## Referanser

- [1] J. Vatlestad and A. Furuset, “Ny rekord for norsk sjømateksport i 2022: 150 milliarder kroner, og laksen sto for 105 milliarder,” *intrafish.no*. URL <https://www.intrafish.no/marked/ny-rekord-for-norsk-sjomateksport-i-2022-150-milliarder-kroner-og-laksen-sto-for-105-milliarder/2-1-1382400> (Lastet ned: 21.02.23).
- [2] Fiskeridirektoratet, “Utviklingstillatelser,” *fiskeridir.no*. URL <https://www.fiskeridir.no/Akvakultur/Tildeling-og-tillatelser/Saertillatelser/Utviklingstillatelser> (Lastet ned: 08.03.2023).
- [3] Redaksjonen iLaks, “Hofseth går inn på eiersiden i Egget – vil bygge fem stykker,” *iLaks.no*. URL <https://ilaks.no/hofseth-gar-inn-pa-eiersiden-i-egget-vil-bygge-fem-stykker/> (Lastet ned: 08.03.2023).
- [4] A. Berge, “– Jeg har det som plommen i Egget,” *iLaks.no*. URL <https://ilaks.no/jeg-har-det-som-plommen-i-egget> (Lastet ned: 08.03.2023).
- [5] H. Aqua, “Addressing key challenges through new innovative technology.” URL <https://haugeaqua.com/technology/egget> (Lastet ned: 17.03.2023).
- [6] Y. Shen, R. Firoozkoobi, M. Greco, and O. M. Faltinsen, “Comparative investigation: Closed versus semi-closed vertical cylinder-shaped fish cage in waves,” *Ocean Engineering*, vol. 245, 2022.
- [7] B. Su, A. Tsarau, P. C. Endresen, D. Kristiansen, and P. F. Lader, “Numerical study of closed rigid fish cages in waves and comparison with experimental data,” *Ocean Engineering*, vol. 233, 2021.
- [8] J. R. Krokstad, “Oversikt over forankringsløsninger: Nye rømningssikre merdkonsept,” Tech. Rep. STF80 A044023, SINTEF Fiskeri og Havbruk AS, Trondheim, Norge, 2005. URL <https://www.fhf.no/prosjekter/prosjektbasen/543033/?fileurl=https://fhfno.sharepoint.com/sites/pdb/Dokumenter/543033/543033oversiktforankring.pdf&filename=Nr.%20%20oversikt%20over%20forankringsl%C3%B8sninger>.
- [9] E. Lien, J. R. Krokstad, and M. A. Heide, “Svaiforankring av oppdrettsanlegg: Nye rømningssikre merdkonsept,” Tech. Rep. STF80 A044027, SINTEF Fiskeri og Havbruk

- AS, Trondheim, Norge, 2005. URL  
<https://www.fhf.no/prosjekter/prosjektbasen/543033/?fileurl=https://fhfno.sharepoint.com/sites/pdb/Dokumenter/543033/543033svaiforankring1.pdf&filename=Nr.%205%20Svaiforankring%20av%20oppdrettsanlegg>.
- [10] A. Fredheim, Ø. Jensen, and S. H. Gjørund, “Sikre og mindre arealkrevende fortøyningsystem for havbruksanlegg,” Tech. Rep. A23164, SINTEF Fiskeri og Havbruk AS, Trondheim, Norge, 2012. URL  
[https://www.fhf.no/prosjekter/prosjektbasen/900789/?fileurl=https://fhfno.sharepoint.com/sites/pdb/Dokumenter/900789/Rapport%20sikre%20og%20mindre%20arealkrevende\\_%20med%20vedlegg-28062012-17092012.pdf&filename=Sluttrapport:%20Sikre%20og%20mindre%20arealkrevende%20fort%C3%B8yningssystem%20for%20havbruksanlegg:%20Oppsummering%20og%20konklusjoner%20fra%20workshop](https://www.fhf.no/prosjekter/prosjektbasen/900789/?fileurl=https://fhfno.sharepoint.com/sites/pdb/Dokumenter/900789/Rapport%20sikre%20og%20mindre%20arealkrevende_%20med%20vedlegg-28062012-17092012.pdf&filename=Sluttrapport:%20Sikre%20og%20mindre%20arealkrevende%20fort%C3%B8yningssystem%20for%20havbruksanlegg:%20Oppsummering%20og%20konklusjoner%20fra%20workshop).
- [11] F. Klaussen, “Eksperimentelle analyser av forankringsløsninger for egget,” Master’s thesis, Institutt for fysikk og teknologi, Universitetet i Bergen, 2023.
- [12] J. Journée and W. Massie, *Offshore Hydromechanics*. Delft University of Technology, 2001.
- [13] G. Stenfelt, “Introduksjon til Marinteknikk - MAS124.” Forelesning, HVL. URL  
[https://home.hvl.no/ansatte/gste/ftp/MAS124\\_Intro\\_Marinteknikk/Litteratur/Notater/Forelesningsnotater\\_GS\\_HVL.pdf](https://home.hvl.no/ansatte/gste/ftp/MAS124_Intro_Marinteknikk/Litteratur/Notater/Forelesningsnotater_GS_HVL.pdf).
- [14] O. M. Faltinsen, *Sea loads on ships and offshore structures*. Cambridge, Storbritannia: Cambridge University Press, 1990.
- [15] B. Pettersen, *Marin teknikk 3: Hydrodynamikk*. Akademika, 2020.
- [16] E. Klemetsen, “Hydrodynamisk motstand og bølgerespons til forskjellige utforminger av et ubemannet overflatefartøy,” Master’s thesis, Institutt for fysikk og teknologi, Universitetet i Bergen, 2020. URL  
<https://bora.uib.no/bora-xmlui/handle/1956/22643>.
- [17] “Environmental Conditions and Environmental Load.” DNV-RP-C205, 2014.
- [18] “DNV Classification notes, Environmental Conditions and Environmental Loads.” DNV-CN-30.5, 2000.

- [19] S. K. Chakrabarti, *Hydrodynamics of Offshore Structures*. Southampton, Storbritannia: WIT Press, 1987.
- [20] DNV GL, *SESAM User Manual: Wadam*, 2017.
- [21] S. K. Chakrabarti, *Handbook of Offshore Engineering*. Storbritannia: Elsevier, 2005.
- [22] J. R. Morison, M. P. O'Brien, J. W. Johnson, and S. A. Schaaf, "The force exerted by surface waves on piles," *Journal of Petroleum Technology*, vol. 2, no. 5, 1950.
- [23] K. Ma, Y. Lou, T. Kwan, and Y. Wur, *Mooring system engineering for offshore structures*. Storbritannia: Gulf Professional Publishing, 2019.
- [24] J. Amdahl *et al.*, *Havromsteknologi*. Bergen, Norge: Fagbokforlaget og NTNU Institutt for Marin Teknikk, 2014.
- [25] AI/Marinseksjonen, *Havbruksteknologi, Naturlaster og Forankring*. Bergen, Norge: Høgskolen i Bergen, 1999.
- [26] T. Hung-Jie, Y. Po-Hung, H. Chai-Cheng, and Y. Ray-Yeng, "Numerical study of the mooring system failure of aquaculture net cages under irregular waves and current," *Ocean Engineering*, vol. 216, 2020.
- [27] SINTEF Ocean, *RIFLEX 4.20.4 User Guide*, 2021.
- [28] C. C. Smith, "Mooring system and hydrodynamic analysis of a closed fish cage using the BIEM method," Master's thesis, Department of Marine Technology, Norwegian University of Science and Technology, 2019. URL <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2622974>.
- [29] ITTC International Towing Tank Community, *Guideline for VIV and VIM Testing*. URL <https://ittc.info/media/4158/75-02-07-0310.pdf?fbclid=IwAR3AVbMtwYI r5FPhcQcF7Y5k1BBLQSP7eS0blWYw9KtX8POEQ7ZnRTGV7o> (Lastet ned: 20.05.2023 ).
- [30] "Forskrift om krav til teknisk stogard for flytende akvakulturanlegg (NYTEK-forskriften)," 2010. URL <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2011-08-16-849> (Lastet ned: 04.04.22).
- [31] "Norsk Standard for Flytende akvakulturanlegg." NS9415, 2021.
- [32] "Global performance analysis of deepwater floating structures." DNV-RP-F205, 2010.



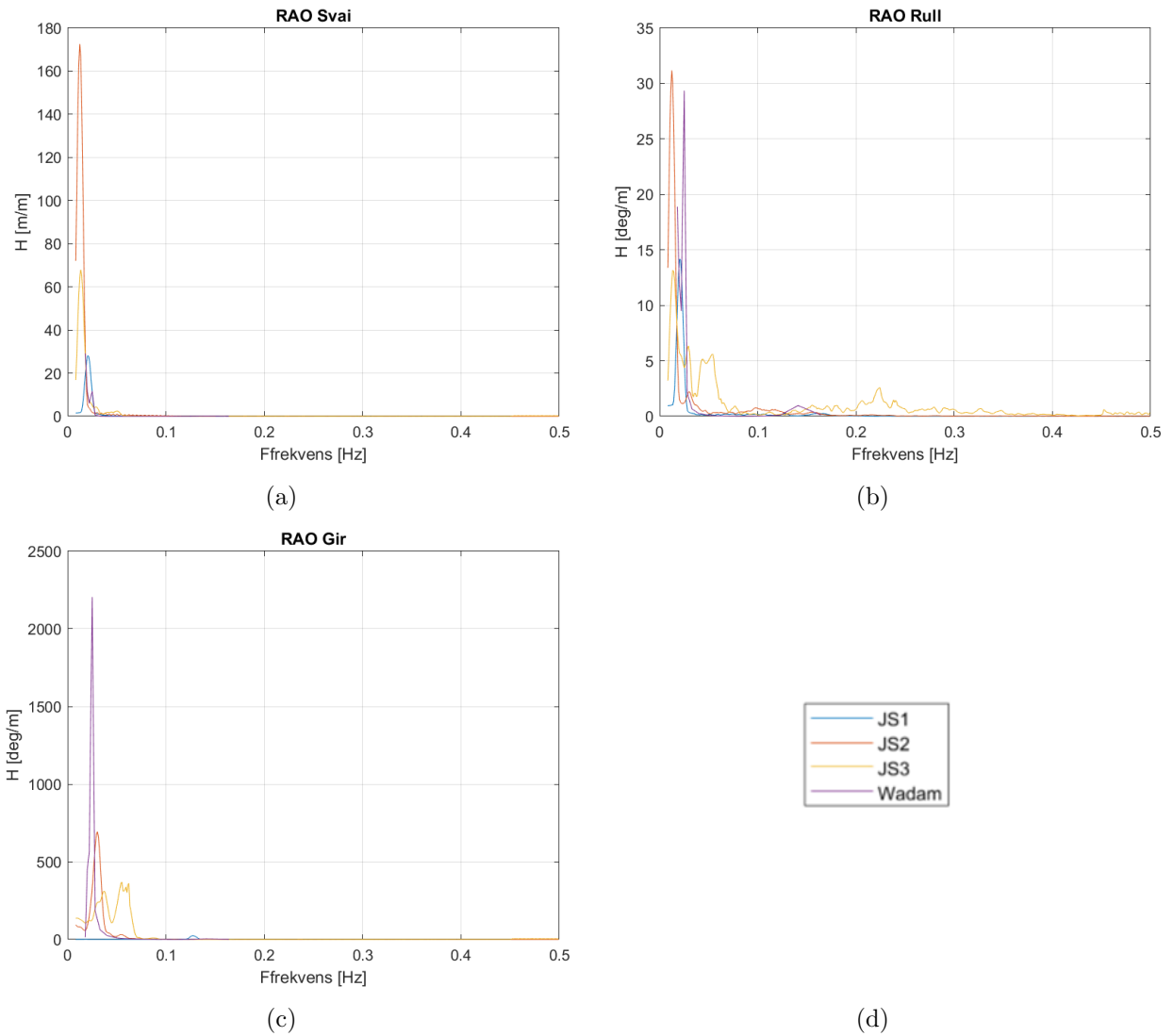
- [33] H. Høidal, J. Nygård, and J. M. Gjærum, “Laminering av et lukket oppdrettsanlegg,” 2021. Bacheloroppgave, Institutt for maskin- og marinfag, Høgskulen på Vestlandet, URL <https://hvlopen.brage.unit.no/hvlopen-xmlui/handle/11250/2762414?show=full>.
- [34] DNV GL, *Sesam Future Description*, 2017.
- [35] SINTEF Ocean, *Sima User Examples*.
- [36] V. Chabaud, “Post-processing data with Matlab®.” Forelesning, NTNU, 2015. URL [https://cdn.fsbx.com/v/t59.2708-21/348966382\\_790241915964723\\_2567032082419698856\\_n.pdf/NTNU\\_Post-processing\\_data\\_with\\_Matlab.pdf?\\_nc\\_cat=111&cb=1-7&\\_nc\\_sid=0cab14&\\_nc\\_ohc=ARL-Gc8zfWkAX\\_x5UMZ&\\_nc\\_ht=cdn.fsbx.com&oh=03\\_AdRSTdfRqfUyF0QSHxGFnr59QcDMDU8KpLCWFZO\\_8yud\\_A&oe=64764100&dl=1](https://cdn.fsbx.com/v/t59.2708-21/348966382_790241915964723_2567032082419698856_n.pdf/NTNU_Post-processing_data_with_Matlab.pdf?_nc_cat=111&cb=1-7&_nc_sid=0cab14&_nc_ohc=ARL-Gc8zfWkAX_x5UMZ&_nc_ht=cdn.fsbx.com&oh=03_AdRSTdfRqfUyF0QSHxGFnr59QcDMDU8KpLCWFZO_8yud_A&oe=64764100&dl=1).

# Vedlegg

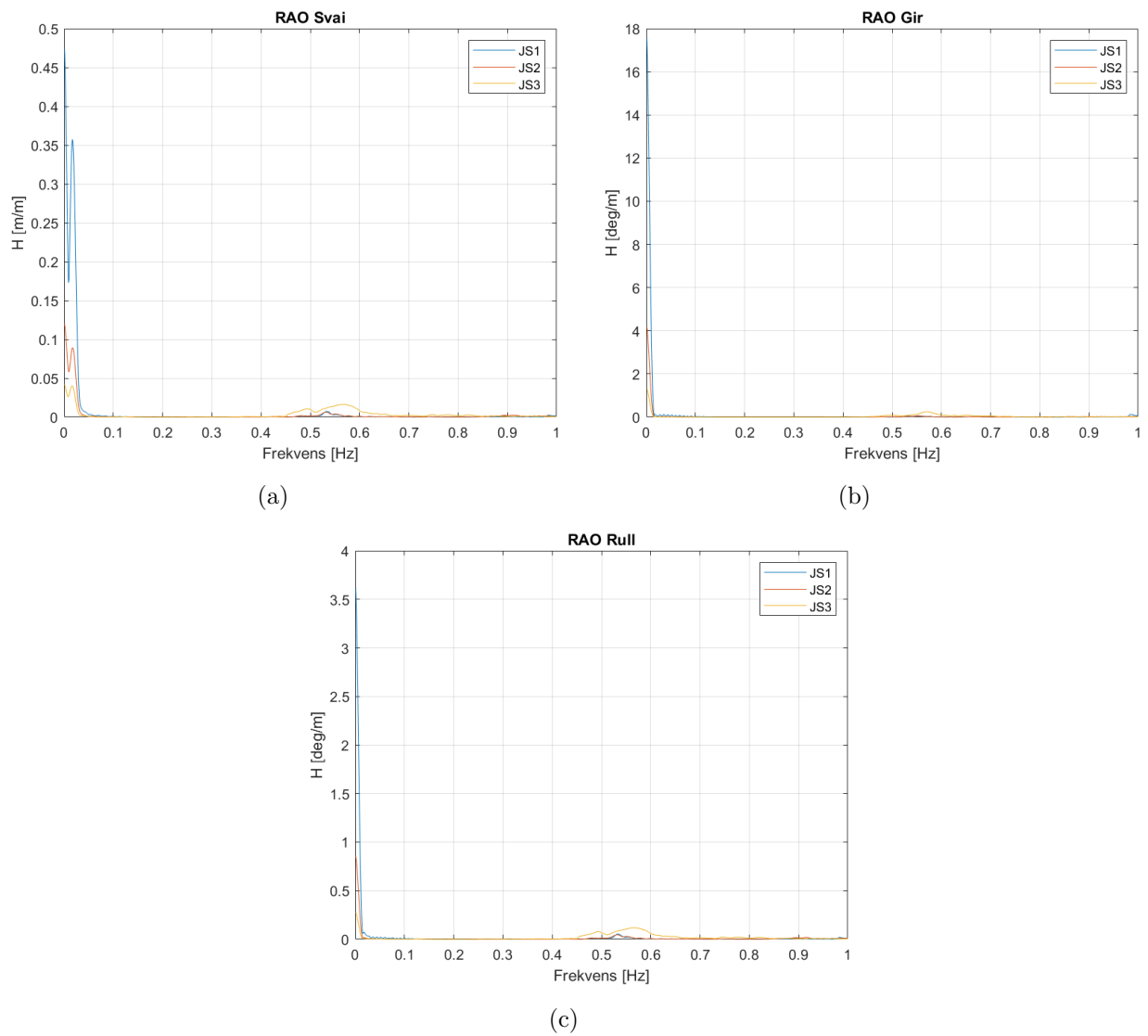
## Vedlegg A: Hydrostatisk tabell

ZWL	Disp	COBx	COBy	COBz	COFx	COFy	COFz	WA	Metacenter Z
1	75351,91	-1,51E-16	3,20E-16	0,127575	0	0	0	1 33,64762	1,353301927
1,5	97891,16	-8,25E-17	-9,44E-17	0,389833	0	0	0	1,5 52,30871	2,669796369
2	128693,1	9,20E-17	-1,73E-16	0,717937	0	0	0	2 67,71982	3,624585905
2,5	167129,2	-5,45E-18	1,67E-17	1,072116	0	0	0	2,5 82,10154	4,361856804
3	212676,8	-6,96E-18	-6,19E-17	1,4328	0	0	0	3 95,47352	4,928695817
3,5	264813,1	-1,03E-17	-4,71E-17	1,791565	0	0	0	3,5 107,8157	5,372064637
4	323016,1	2,47E-18	-8,94E-17	2,145198	0	0	0	4 119,1533	5,730298126
4,5	386773	-6,18E-18	4,24E-17	2,49273	0	0	0	4,5 129,4842	6,028560871
5	455563	2,75E-18	5,95E-18	2,834014	0	0	0	5 138,7937	6,283104031
5,5	528862	2,80E-18	-2,52E-17	3,169199	0	0	0	5,5 147,0807	6,505624915
6	606146	3,57E-18	-4,87E-17	3,498508	0	0	0	6 154,3453	6,7042082
6,5	686891,4	9,77E-18	6,45E-18	3,822145	0	-8,85E-17	0	6,5 160,5881	6,884483856
7	770574,8	-6,79E-18	-1,79E-17	4,140251	-8,57E-17	0	0	7 165,8111	7,050468906
7,5	856673	1,86E-18	-9,99E-18	4,452895	0	0	0	7,5 170,0118	7,204938635
8	944662,4	-1,05E-17	1,72E-17	4,760072	0	0	0	8 173,1912	7,349989783
8,5	1034020	1,08E-17	1,41E-17	5,061707	0	0	0	8,5 175,3502	7,487151193
9	1124222	2,73E-18	-1,82E-17	5,357661	0	0	0	9 176,49	7,61757595
9,5	1214749	-3,75E-18	1,81E-17	5,647731	0	0	0	9,5 176,6383	7,742767246
10	1305142	-1,22E-17	9,21E-18	5,93184	0	1,61E-16	0	10 176,0034	7,867786069
10,5	1395032	-3,51E-18	3,13E-17	6,210064	0	0	0	10,5 174,6684	7,993909299
11	1484055	-3,53E-18	-1,64E-18	6,482368	0	0	0	11 172,6203	8,120113899
11,5	1571845	-8,25E-18	3,68E-18	6,748613	0	0	0	11,5 169,8571	8,245777835
12	1658038	-7,14E-18	-1,36E-17	7,008564	0	0	0	12 166,3867	8,370504076
12,5	1742270	-1,12E-17	-1,88E-17	7,261917	0	0	0	12,5 162,2038	8,493673551
13	1824179	-1,02E-17	-2,13E-18	7,508283	0	9,03E-17	0	13 157,321	8,614962576
13,5	1903398	-5,38E-19	4,46E-18	7,747189	0	0	0	13,5 151,7087	8,733505702
14	1986003	-3,09E-18	-1,64E-17	7,997276	0	0	0	14 176,6944	9,279546868
14,5	2076559	-9,32E-19	-6,55E-18	8,269949	0	0	0	14,5 176,6943	9,496299686
15	2167115	-1,79E-18	-1,13E-17	8,540726	0	0	0	15 176,6943	9,715832933
15,5	2257671	2,92E-18	3,68E-18	8,809837	0	0	0	15,5 176,6944	9,937811105
16	2348227	3,25E-18	4,14E-18	9,077474	0	-1,61E-16	0	16 176,6944	10,16194922
16,1	2366338	-5,34E-18	-1,19E-17	9,13084	0	0	0	16,1 176,6944	10,20701441
16,2	2384449	-3,53E-18	-1,22E-18	9,184154	1,61E-16	0	0	16,2 176,6944	10,25215457
16,3	2402560	-9,95E-18	2,34E-19	9,237419	0	0	0	16,3 176,6944	10,29736813
16,4	2420671	-6,91E-18	2,44E-18	9,290634	0	0	0	16,4 176,6943	10,34265175
16,5	2438782	1,12E-18	2,02E-18	9,343802	0	0	0	16,5 176,6944	10,3880076
16,6	2456894	-2,83E-18	3,56E-19	9,396923	0	0	0	16,6 176,6945	10,43343301
16,7	2475005	-3,22E-19	-1,39E-17	9,449998	0	0	0	16,7 176,6945	10,47892309
16,8	2493116	-1,78E-18	-8,62E-18	9,503029	0	0	0	16,8 176,6945	10,52447934
16,9	2511227	-9,06E-20	-1,58E-17	9,556016	0	0	0	16,9 176,6944	10,57009916
17	2529338	-1,66E-18	6,69E-18	9,60896	0	0	0	17 176,6945	10,61578238

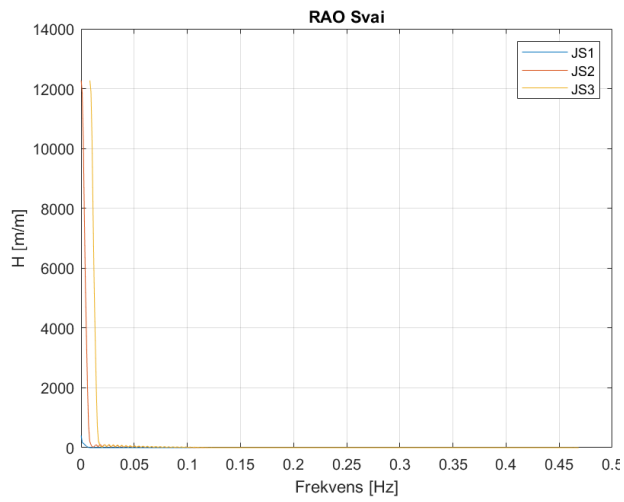
## Vedlegg B: RAO



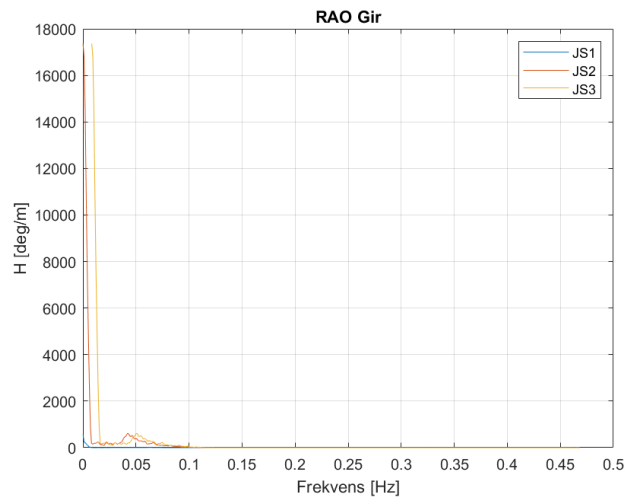
Figur 54: RAO til svai, rull og gir ved forenklet rammefortøyning



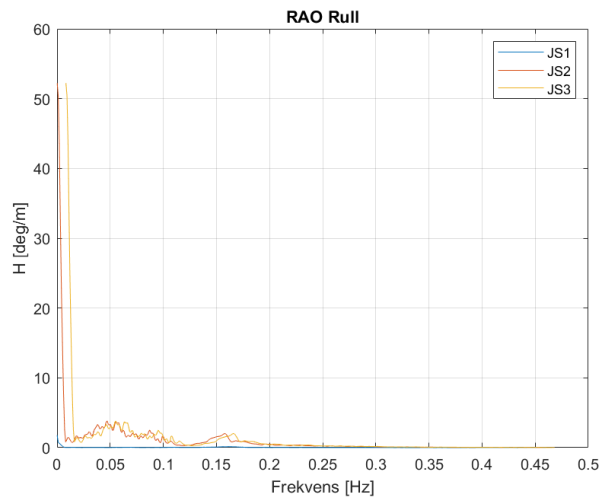
Figur 55: RAO til svai, rull og gir ved fullstendig rammefortøyning



(a)



(b)



(c)

Figur 56: RAO til svai, rull og gir ved ettpunktsforankring